

EIN UMFASSENDES
MENSCH-MASCHINE-KOMMUNIKATIONS-MODELL
ZUR ON-LINE-SIMULATION
VON PRODUKTIONSABLÄUFEN IN DER
WERKSTATT- UND REIHENFERTIGUNG
UND SEIN EINSATZ IM
RAHMEN DES COMPUTERUNTERSTÜTZTEN
ENTSCHEIDUNGSTRAININGS

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung des Akademischen Grades eines Doktors
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.)
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt von
Dipl.-Kfm. Gerhard Dobler
aus Stuttgart

1976

EIN UMFASSENDES
MENSCH-MASCHINE-KOMMUNIKATIONS-MODELL
ZUR ON-LINE-SIMULATION
VON PRODUKTIONSABLÄUFEN IN DER
WERKSTATT-UND REIHENFERTIGUNG
UND SEIN EINSATZ IM
RAHMEN DES COMPUTERUNTERSTÜTZTEN
ENTSCHEIDUNGSTRAININGS

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung des Akademischen Grades eines Doktors
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.)
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt von
Dipl.-Kfm. Gerhard Dobler
aus Stuttgart

Gedruckt mit Erlaubnis des Fachbereichs Wirtschafts.-
und Sozialwissenschaften der Universität Erlangen - Nürnberg



Referent: Prof.Dr.P.Mertens
Korreferent: Prof.Dr.W.Pfeiffer
Promotionstermin: 17.2.1976

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
0. Kurzfassung	1
1. Simulationsmodelle für den Produktionssektor: Eine Literaturübersicht	3
1.1. Literaturbeschreibung	4
1.1.1. Testmodelle	4
1.1.1.1. Modelle zur Ablaufplanung	4
1.1.1.2. Modelle zur Layoutplanung	9
1.1.1.3. Modelle zur Instandhaltungsplanung	10
1.1.2. Modelle für den Praxiseinsatz	12
1.1.3. Modelle als Versuchsfeld für die Anwendung geeigneter Programmiersprachen	13
1.1.4. Ein Modell für den Einsatz im Computerunterstützten Unterricht	15
1.1.5. Modelle zur Erforschung des menschlichen Entschei- dungsverhaltens	15
1.1.6. Der Sonderfall eines materialflußorientierten Modells	17
1.2. Literaturliste	18
2. Problemstellung und daraus abgeleitete Anforderungen an ein Werkstatt-Simulations-System (WSS)	23
3. Konzeption eines Modells zur Simulation von Werkstattabläufen	28
3.1. Grundstruktur des Modells	28
3.2. Eigenschaften des Modells	33
3.2.1. Auftragsbezogene Eigenschaften	33
3.2.1.1. Ankunftsprozeß	33
3.2.1.2. Auftragszusammensetzung	33
3.2.1.3. Technologische Reihenfolgen	34
3.2.1.4. Zeitkomponenten	36
3.2.1.4.1. Rüstzeiten	36
3.2.1.4.2. Operationszeiten	38
3.2.1.4.3. Fertigungszeiten	39
3.2.1.4.4. Übergangszeiten	39
3.2.1.4.5. Endtermine	39
3.2.1.5. Losgrößen	40
3.2.1.6. Produktwerte	40
3.2.1.7. Organisatorische Reihenfolgen	41

	Seite
3.2.2. Betriebsmittelbezogene Eigenschaften	51
3.2.2.1. Layoutplanung	51
3.2.2.2. Kapazität von Maschinengruppen	52
3.2.2.3. Personalkapazität	53
3.2.2.4. Kapazität von Zwischenlagern	53
3.2.2.5. Instandhaltung von Maschinengruppen	53
3.2.3. Simulationstechnik	56
3.2.4. Kostenbestandteile	59
3.2.5. Zielsystem	61
3.3. Wichtige Prämissen des Modells	63
4. Realisierung eines EDV-Modells zur Simulation von Werkstatt-abläufen	65
4.1. Aufbau und Inhalt des Modells	65
4.2. Beschreibung der Eingabedaten	70
4.2.1. Systemparameter	70
4.2.2. Stammdaten	72
4.2.3. Entscheidungsebene 1	73
4.2.4. Entscheidungsebene 2	75
4.2.5. Programmsteuerung	77
4.3. Simulationskern	78
4.3.1. Wichtige Bausteine des Simulators	78
4.3.2. Grobflußplan des Simulators	81
4.3.3. Simulationsablauf	84
4.4. Beschreibung der Ausgabedaten	86
4.4.1. Maschinengruppen-Bericht	86
4.4.2. Auftrags-Bericht	88
4.4.3. Warteschlangen-Bericht	89
4.4.4. Kosten-Leistungs-Bericht	90
4.4.5. Alternativen-Vergleich	90
5. Einsatz der Mensch-Maschine-Kommunikation als Mittel zur Entscheidungsfindung	91
5.1. Gestaltung des Modells als On-line-Simulator	91
5.2. Basissoftware und technische Voraussetzungen	92
5.3. Dialogaufbau	94

	Seite
5.3.1. Erläuterungen zu den Dialogablaufplänen	94
5.3.2. Dialogablaufpläne	100
5.3.2.1. Dialog-Eingabeteil	100
5.3.2.2. Dialog-Ausgabeteil	100
5.4. Ein beispielhafter Dialogablauf	110
6. Simulationsexperimente	127
6.1. Auslegung und Bemessung der Simulationsexperimente	127
6.2. Simulationsläufe	131
6.2.1. Lösung einfacher Entscheidungsprobleme	132
6.2.1.1. Experimentanordnung	132
6.2.1.2. Auswertungsmethoden	133
6.2.1.3. Ausgewählte Simulationsergebnisse	136
6.2.1.4. Zusammenfassende Beurteilung der Simulationsergebnisse	152
6.2.2. Lösung komplexer Entscheidungsprobleme	157
6.3. Wichtige Erkenntnisse aus dem Experimentverlauf	163
7. Einbettung des Modells in das CET (Computerunterstütztes Entscheidungsstraining)	166
7.1. Grundgedanken des CET	166
7.2. Fallstudien	167
7.3. Praktische Erfahrungen mit Benutzern des Systems	168
7.3.1. Handhabung des Systems	170
7.3.2. Benutzer in besonderen Entscheidungssituationen	175
7.3.3. Verwendung des Ergebnisteils	182
7.3.4. Allgemeine Erkenntnisse	183
8. Anhang	185
8.1. Liste der verwendeten Symbole	185
8.2. Liste der verwendeten Abkürzungen	188
8.3. Tabellenverzeichnis	189
8.4. Abbildungsverzeichnis	191
8.5. Literaturverzeichnis	192

	Seite
8.6. Programmlisten	A1
8.6.1. Hinweise für den Programmierer	A1
8.6.1.1. Feldvereinbarungen	A1
8.6.1.2. Moduln des Simulationskerns	A8
8.6.1.3. Moduln der Dialogteile	A10
8.6.2. Hinweise für den Systembetreuer	A13
8.6.2.1. Handhabung des Systems	A13
8.6.2.2. Dateiinhalte	A18
8.6.2.2.1. Bildmasken	A18
8.6.2.2.2. Stammdaten	A31
8.6.3. Dateiladeprogramm für Textkonserven	A41
8.6.4. Dateiladeprogramm für Stammdaten	A42
8.6.5. Werkstatt-Simulations-System (WSS)	A45
8.6.5.1. Steuersegment	A45
8.6.5.2. Simulator	A46
8.6.5.3. Dialog-Eingabeteil	A60
8.6.5.4. Dialog-Ausgabeteil	A92
8.6.6. Testprogramm	A108
8.7. Versuchsergebnisse	A109
8.7.1. Ergebnistabellen	A109
8.7.2. Ergebnismuster	A146

Abschnitt 8.6. - 8.7.: gesonderter Band

D. Kurzfassung

Die Zielrichtung, ein Mensch-Maschine-Kommunikationsmodell zu konzipieren und zu erstellen, bedingt naturgemäß die Einbeziehung zahlreicher Problemkreise, die zumeist getrennt voneinander in Form vielfältiger Lösungsvorschläge und Modelle in der Literatur zu finden sind. Die Literaturübersicht (Abschnitt 1) enthält eine chronologische Zusammenstellung aller Quellen, aus denen Ideen für die vorliegende Arbeit entnommen wurden. Die Literaturbeschreibung erfolgt unter den fünf Gesichtspunkten, unter denen erfahrungsgemäß Arbeiten dieser Art entstehen: ihre Auslegung als nicht für die Praxis erstellte Testmodelle mit dem Hauptgewicht auf gewonnenen Versuchsergebnissen, als Planungsmodelle für den Praxiseinsatz, als Versuchsmodelle für die Eignung spezieller Programmiersprachen, als Lehrpakete für den Computerunterstützten Unterricht und als Modelle zur Erforschung des menschlichen Entscheidungsverhaltens. Zusätzlich wird ein materialflußorientiertes Modell vorgestellt, das sich in die vorstehende Systematik schlecht einreihen läßt. Die erwähnten Quellen sind in einer Literaturliste zusammengefaßt.

Im 2. Abschnitt verdeutlichen einige Beispiele die Problemstellung, die i. w. darin besteht, die Wechselwirkung zwischen Einfluß- und Zielgrößen im Werkstattbereich offenzulegen. Daraus leiten sich spezielle Anforderungen an das zu konzipierende Modell ab, welche die Aufgabe beinhalten, ein möglichst flexibles On-line-Simulationssystem aufzubauen, das sowohl Studenten als auch Praktikern als Trainingsinstrument zur Verfügung steht.

Ein theoretischer Teil (3. Abschnitt) präsentiert zunächst die Grundstruktur des Modells und charakterisiert seine wichtigsten Bestandteile. Die Eigenschaften des Modells lassen sich in verschiedener Hinsicht beleuchten. Zum einen ist vom Auftrag auszugehen, zum anderen von den Betriebsmitteln, die von den Aufträgen passiert werden. Außerdem wird auf wichtige Punkte wie die Simulationstechnik, die Zusammensetzung der Kosten und das zugrundeliegende Zielsystem eingegangen. Die Erörterung einiger wichtiger Prämissen des Modells bildet den Abschluß des 3. Abschnittes.

Die praktische Realisierung des Konzepts in Form eines EDV-Modells ist im 4. Abschnitt grob beschrieben. Diesem Teil der Arbeit liegt auch die Zielsetzung zugrunde, dem potentiellen Anwender den Umgang mit dem System zu erleichtern. Er erhält so eine vertiefte Kenntnis von den Eingabedaten auf unterschiedlichen Ebenen, von der Funktionsweise des Simulationskerns und von dem Zustandekommen und der Bedeutung der Ausgabedaten.

Der 5. Abschnitt geht besonders auf die Dialogfähigkeit des EDV-Modells ein. Dazu gehört eine Beschreibung der Basissoftware, die dem System zugrunde liegt, sowie die Erläuterung des Dialogaufbaus. In einem weiteren Teil werden Beispiele vorgeführt, wie man in direkter Verbindung mit dem Rechner arbeiten kann.

Der 6. Abschnitt beschreibt einige ausgewählte Simulationsexperimente. Nach der Erörterung von Problemen der Auslegung und Bemessung der Simulationsexperimente folgt eine Darstellung der V Versuchsergebnisse und ihre Diskussion.

Das System ist Bestandteil des CET (Computerunterstütztes Entscheidungstraining) der Universität Erlangen-Nürnberg. Der 7. Abschnitt erläutert zunächst den Grundgedanken des CET. Anschließend sind die Fallstudien erwähnt, die im Lehrbetrieb eingesetzt werden. Schließlich folgt ein Bericht über praktische Erfahrungen mit Benutzern des Systems.

Der 8. Abschnitt (Anhang) besteht aus einer Zusammenfassung der in der Arbeit verwendeten Symbole und Abkürzungen, einer Übersicht über Tabellen und Abbildungen, einem alphabetischen Literaturverzeichnis, einer Programmdokumentation und den FORTRAN-IV-Programmen.

1. Simulationsmodelle für den Produktionssektor:

Eine Literaturübersicht

Die vorliegende Arbeit ist mit der Zielrichtung entstanden, ein möglichst umfassendes Simulationsmodell für den Produktionsbereich zu schaffen und es für das Computerunterstützte Entscheidungstraining einzusetzen.

Die meisten Veröffentlichungen zielten entweder darauf ab, theoretische Modelle und daraus entstandene Versuchsergebnisse zu beschreiben oder die Vorteilhaftigkeit des einen oder anderen in der Praxis eingesetzten Programms zu demonstrieren.

Aus den erwähnten Quellen konnten zwar wichtige gedankliche Elemente entnommen werden, jedoch entsprach keines der dargestellten Modelle der Zielsetzung und den Anforderungen, die im 2. Abschnitt ausführlich beschrieben sind. Deshalb und wegen der Fülle der in der Literatur entwickelten Teilmodelle und Konzepte kann dieser Abschnitt nur den Charakter einer Übersicht haben.

Eine allgemeine Literaturbeschreibung enthält den bisherigen Entwicklungsgang und derzeitigen Entwicklungsstand auf dem Sektor der Simulationsmodelle für den Produktionsbereich.

Im wesentlichen lassen sich folgende Zielsetzungen unterscheiden, unter denen Simulationsmodelle für den Produktionssektor entstanden sind:

- (1) Testmodelle, die nicht unmittelbar für den praktischen Einsatz in Industriebetrieben konzipiert sind.
- (2) Modelle für den Praxiseinsatz.
- (3) Modelle als Versuchsfeld für die Anwendung geeigneter Programmiersprachen.
- (4) Ein Modell für den Einsatz im Computerunterstützten Unterricht.
- (5) Modelle, die mit der Zielsetzung entstanden sind, das Entscheidungsverhalten von Managern und Studenten zu erforschen.

Der Sonderfall eines materialflußorientierten Modells läßt sich schwer in eine Systematik einordnen und wird deshalb in einem gesonderten Abschnitt behandelt.

Dieser Teil der Untersuchung wird durch eine chronologische Übersicht über die beschriebene Literatur abgeschlossen.

1.1. Literaturbeschreibung

1.1.1. Testmodelle

Die Mehrzahl der Literaturstellen über Ablaufplanung sowie alle uns bekannten Quellen über Layout- und Instandhaltungsplanung ließen den Grundcharakter von Testmodellen ohne die konkrete Zielrichtung erkennen, sie in der Praxis einzusetzen.

1.1.1.1. Modelle zur Ablaufplanung

Abstrakte Überlegungen zur Ablaufplanung und daraus abgeleitete analytische Verfahren ¹⁾ bringen zwar den Vorteil mit sich, im Rahmen gesetzter Restriktionen meist optimale Ergebnisse zu liefern, dienen jedoch allenfalls zur Problembeschreibung bzw. zur Lösung begrenzter Teilaufgaben.

Ebenso sind Simulationsmodelle, bei denen lediglich aus einer Menge zulässiger Belegungen durch Zufallsauswahl Stichproben entnommen werden und daraus die beste Lösung ermittelt wird ²⁾, von ihrer Grundkonzeption her nicht geeignet, dynamische Fertigungsprozesse (zum Begriffsinhalt vgl. Abschnitt 3.2.1.1.) abzubilden.

1) vgl. Conway, R. W., Maxwell, W. L. und Miller, L. W., Theory of Scheduling, Reading (Mass.) 1967, S. 1 ff. (Kap. 1-10);

eine gute Zusammenfassung analytischer Verfahren findet sich auch in: Müller, E., Simultane Lagerdisposition und Fertigungsablaufplanung bei mehrstufiger Mehrproduktfertigung, Berlin - New York 1972, S. 18 ff.;

siehe auch einige Verfahren in: Mertens, P., Industrielle Datenverarbeitung, Band 1, 2. Aufl., Wiesbaden 1972, S. 235 ff.;

ein umfassendes Optimierungsmodell beschreibt: Pressmer, D. B., Theorie der dynamischen Produktionsplanung, Habilitationsschrift Hamburg 1972, S. 123 ff.

2) vgl. zusammenfassende Übersicht bei: Keck, H., Die Bearbeitung einiger Ablaufplanungsprobleme mit Hilfe der Simulation. Eine Literaturstudie, in: Bussmann, K. F. und Mertens, P. (Hrsg.), Operations Research und Datenverarbeitung bei der Produktionsplanung, Stuttgart 1968, S. 215 ff.

Ähnliche Modelle ³⁾, bei denen durch Generierung organisatorischer Reihenfolgen (vgl. Abschnitt 3.2.1.7.) die Menge der betrachteten Lösungen eingeschränkt und damit Rechenaufwand eingespart werden kann, bleiben aus demselben Grund außer Betracht.

Vielmehr stehen bei unserer Untersuchung solche Modelle im Vordergrund, bei denen der Fertigungsprozeß durch ein Netz von Einkanal-Warteschlangen abgebildet wird und die sich zum Abbau von Warteschlangen bestimmter Prioritätsregeln bedienen (vgl. Übersicht in Abschnitt 1.2.). Dabei berücksichtigen die Regeln diejenige Datenkonstellation, die sich zum Zeitpunkt des Auswahlprozesses in der Fertigung eingestellt hat.

Die ersten bekannten Entwicklungen waren vergleichsweise einfach aufgebaut. Jackson begann damit, verschiedene Varianten von zeitabhängigen Prioritätsregeln zu testen ⁴⁾. Insbesondere standen dabei Zielkriterien wie "minimale mittlere Durchlaufzeit" oder "minimale Varianz der Durchlaufzeiten" von abgeschlossenen Aufträgen im Vordergrund.

3) vgl. Schreiter, D., Ein Simulationsmodell zur Lösung des Reihenfolgeproblems bei gleicher technologischer und organisatorischer Reihenfolge, in: Schreiter, D. u.a. (Hrsg.), Simulationsmodelle für ökonomisch-organisatorische Probleme, Köln und Opladen 1968, S. 13 ff.

4) vgl. Jackson, J. R., Simulation Research on Job Shop Production, Naval Research Logistics Quarterly 4 (1957), S. 287 ff.;
Baker, C. T. und Dzielinsky, B. P., Simulation of a Simplified Job Shop, Management Science 6 (1960), S. 311 ff.;
spätere Veröffentlichung von: Buzi, K., Die Simulation optimaler Prioritätsregeln für die Ablaufplanung in der Werkstattfertigung, Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2085, Köln und Opladen 1971.

In weiteren Untersuchungen wurden Wechselwirkungen zwischen Kapazitätsauslastung in der Fertigung einerseits und Prioritätsregeln andererseits festgestellt ⁵⁾. Später versuchte man, durch Rückwärtsterminierung Beginn- bzw. Endtermine für jeden Arbeitsgang eines Auftrages zu ermitteln und bestimmte dazu passende Prioritätsregeln im Hinblick auf Zielkriterien wie "Anzahl verspäteter Aufträge" oder "mittlere Terminverspätung" zu testen ⁶⁾.

Die Versuchsergebnisse von Conway bildeten zu dieser Gruppe von Veröffentlichungen einen gewissen Abschluß ⁷⁾. Conway testete nicht nur zeitabhängige Prioritätsregeln, sondern auch solche, die unterschiedliche Auslastungsgrade an den Folgemaschinen von Aufträgen berücksichtigen. Außerdem überprüfte er systematisch die Eignung verschiedener Kombinationen von Prioritätskriterien für die Erfüllung bestimmter Zielsetzungen. Die Versuchsreihen von Carroll ⁸⁾, in denen Kostengesichtspunkte (Verspätungskosten) in eine Prioritätsregel einbezogen wurden, sind als Ergänzung zur RAND-Studie ⁷⁾ zu sehen.

⁵⁾ vgl. Rowe, A. J., Toward a Theory of Scheduling, Journal of Industrial Engineering 11 (1961), S. 125 ff.;

Allen, M., The Efficient Utilization of Labor under Condition of Fluctuating Demand, in: Muth, J. F. und Thompson, G. L. (Hrsg.), Industrial Scheduling, Englewood Cliffs (N. J.) 1963, S. 252 ff.

⁶⁾ vgl. Ackermann, S. S., Even-Flow, A Scheduling Method for Reducing Lateness in Job Shops, Management Technology 3 (1963), S. 20 ff.

⁷⁾ vgl. Conway, R. W., An Experimental Investigation of Priority Assignment in a Job Shop, RAND Corporation Memorandum RM-3789-PR, Santa Monica (Cal.) 1964;

Conway, R. W., Maxwell, W. L. und Miller, L. W., a.a.O., S. 219 ff. (Kap. 11).

⁸⁾ vgl. Carroll, D. C., Heuristic Sequencing of Single and Multiple Component Jobs, PhD Thesis, MIT, A. P. Sloan School of Management, 1965.

Neuere Veröffentlichungen befaßten sich u. a. mit dem Problem reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten⁹⁾. Hier wird bewußt von solchen Arbeiten abgesehen, die - basierend auf heuristischen Verfahren - lediglich statische Reihenfolgeprobleme¹⁰⁾ zu lösen vermögen¹¹⁾. Bei dynamischen Simulationsmodellen standen verschiedene Kombinationen zwischen Rüst- und Operationszeiten¹⁰⁾ als Prioritätskriterien im Vordergrund. Seelbach¹²⁾ schlug eine Prioritätsregel vor, die - je nach Auslastungs- und Termsituation - zwischen den beiden Kriterien Sortenwechselkosten und Restfertigungszeiten eines Auf-

9) vgl. Baker, K. R., Priority Dispatching in the Single Channel Queue with Sequence-Dependent Setups, Journal of Industrial Engineering 19 (1968), S. 203 ff. ;

Gräßler, D., Der Einfluß von Auftragsdaten und Entscheidungsregeln auf die Ablaufplanung von Fertigungsstraßen, Diss. Aachen 1968;

Hollier, R. H., A Simulation Study of Sequencing in Batch Production, Operational Research Quarterly 19 (1968), S. 389 ff.;

Berr, U. und Papendieck, A. J., Produktionsreihenfolgen und Losgrößen der Serienfertigung in einem Werkstattmodell, Werkstattstechnik 60 (1970), S. 191 ff.;

Wilbrecht, J. K. und Prescott, W. B., The Influence of Setup Time on Job Shop Performance, Management Science 16 (1970), S. B-294 ff.

10) vgl. Erläuterungen in Abschnitt 3.2.1.

11) vgl. Übersicht über bisher bekannte Modelle und Darstellung eines weiteren Verfahrens in: Rueger, M., Die Berücksichtigung reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten bei der Reihenfolgeplanung, Diss. Köln 1974, S. 34 ff. und S. 157 ff.

12) vgl. Seelbach, H., Interdependente Programm- und Prozeßplanung, in: Koch, H. (Hrsg.), Zur Theorie des Absatzes, Wiesbaden 1973, S. 447 ff.

trages umschalten kann. Schließlich hatten aktuelle Arbeiten Modelle zur simultanen Minimierung der mittleren Durchlaufzeiten bzw. deren Varianten einerseits und der Lagerkosten andererseits mit Hilfe geeigneter Prioritätskriterien zum Inhalt ¹³⁾. In weiteren Studien wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen Losgrößen und Kapitalbindungskosten in der Fertigung herzustellen ¹⁴⁾. Auch Kapazitätsabstimmungs- und -zuordnungsprobleme in Werkstätten waren Gegenstand verschiedener Untersuchungen ¹⁵⁾.

Schließlich erhob sich in neuester Zeit eine kritische Stimme, die komplizierte, insbesondere dynamische Prioritätsregeln einer Kosten-Nutzen-Analyse unterzog ¹⁶⁾. New stellte die Wirksamkeit bestimmter Typen von Prioritätsregeln den Kosten ihrer Handhabung gegenüber.

13) vgl. Müller, E., a.a.O., S. 87 ff.

14) vgl. Cantellow, D. G. u. a., Machine-Shop Problems: An Operational Research Approach, Operational Research Quarterly 24 (1973), S. 503 ff.

15) vgl. Leigh, J. G., A Model for Predicting the Performance of a Job Shop, Operational Research Quarterly 25 (1974), S. 131 ff.

16) vgl. New, C. C., Job Shop Scheduling: Is Manual Application of Dispatching Rules Feasible?, Operational Research Quarterly 26 (1975), S. 35 ff.

1.1.1.2. Modelle zur Layoutplanung

Zur Lösung des Layoutproblems (Planung der Maschinenaufstellung) gibt es zahlreiche Modelle, die sich für eine Berücksichtigung im Rahmen dieser Arbeit nicht eignen, da sie von der Ablaufplanung isoliert sind ¹⁷⁾.

Interessant ist das Modell von Fleischmann/Saur (vgl. Übersicht in Abschnitt 1.2.) ¹⁸⁾, das es ermöglicht, in einem mehrstufigen Entscheidungsprozeß Änderungen am Layout, an Produktionsmengen sowie an Produktions- und Kompositionsvorschriften vorzunehmen. Dabei steht ein deterministisches Ablaufplanungsverfahren im Mittelpunkt, anhand dessen beispielsweise mögliche Layout-Varianten getestet werden können.

17) vgl. zusammenfassende Darstellung bei:
Herold, D., Die Problematik des Layout im Fertigungsbereich
von Industriebetrieben, Diss. Berlin 1972;

einzelne Modelle von:

Matthée, R., MABETRA - materialflußorientierte Betriebsmittel-
anordnung mit minimaler Transportleistung, Industrial
Engineering 4 (1974), S. 99 ff.;

Ritzmann, L. P., The Efficiency of Computer Algorithms for
Plant Layout, Management Science 18 (1972), S. 240 ff.;

Wesolowsky, G. D., Location of Facilities with Rectangular
Distances Among Point and Area Destinations, Naval Research
Logistics Quarterly 18 (1971), S. 83 ff.

18) vgl. Fleischmann, B. und Saur, H. D., Ein allgemeines
Simulationsmodell für mehrstufige kontinuierliche Fertigung,
in: Gessner, P. u. a. (Hrsg.), Proceedings in Operations
Research 3, Würzburg - Wien 1973, S. 420 ff.

1.1.1.3. Modelle zur Instandhaltungsplanung

Auch für den Bereich der Instandhaltungsplanung bleiben analytische Verfahren außer Betracht ¹⁹⁾. Ebenso sind Instandhaltungsmodelle für die Luftfahrtindustrie bzw. für den zivilen und militärischen Bereich der Instandhaltung von Flugkörpern in diesem Zusammenhang von untergeordneter Bedeutung, da man die dort gelösten Probleme nicht ohne weiteres mit denen der Instandhaltung industrieller Produktionsanlagen vergleichen kann ²⁰⁾. In jenem Bereich sind Instandhaltungsaktivitäten so organisiert, daß Überholteile ganze Werkstätten durchlaufen. Dementsprechend sind diese Simulationsmodelle im wesentlichen als Ablaufplanungsmodelle konstruiert, wären strenggenommen also in Abschnitt 1.1.2. einzuordnen.

Für den Anwendungsbereich "Instandhaltung industrieller Produktionsanlagen" wurde zunächst ein einfaches Simulationsmodell ²¹⁾ aufgebaut, das sich insbesondere auf das Problem bezog, welche Art von Instandhaltungsaufträgen im Hinblick auf eine Maximierung des Beschäftigungsgrades vorzuziehen sei. Es wurden Schadens- und vorbeugende Reparaturen unterschieden.

19) Eine Übersicht über Instandhaltungsliteratur findet man bei: Kress, H., Bibliographie der Instandhaltungsliteratur, Meisenheim am Glan 1970.

20) vgl. dazu insbesondere: Gröger, H., EROS (Engine Repair and Overhaul Simulation) - ein Planungsinstrument für Triebwerksinstandhaltungswerkstätten von Luftverkehrsgesellschaften, in: Bussmann, K. F. und Mertens, P. (Hrsg.), Operations Research und Datenverarbeitung bei der Instandhaltungsplanung, Stuttgart 1968, S. 137 ff.

21) vgl. Vergin, R. C., Scheduling Maintenance and Determining Crew Size for Stochastically Failing Equipment, Management Science 13 (1966), S. 8-52 ff.

Ein weiteres Simulationsmodell.²²⁾ befaßte sich mit dem Personaleinsatz für Schadensreparaturen. Das Entscheidungsproblem der vorbeugenden Instandhaltung blieb hier außer Betracht. Kress²³⁾ untersuchte zehn verschiedene Prioritätsregeln im Hinblick auf das Ziel der Minimierung der Instandhaltungskosten. Ordeltz²⁴⁾ beschrieb ein Simulationsmodell, mit dem er den Einfluß von Reparaturstrategien auf die Stillstandsrate, den Auslastungsgrad der Reparaturkapazitäten und den Ersatzteilverbrauch testete.

Eine sehr feinnervige Konzeption zur Untersuchung verschiedener Ersatzpolitiken in komplexen Produktionssystemen entwickelte Scheer²⁵⁾. In seinem Simulationsmodell fanden sowohl Elemente der Fließfertigung als auch der Werkstattfertigung Berücksichtigung. Das Schwergewicht seiner Versuche liegt in den zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Ersatzstrategie, Instandhaltungskapazität bzw. Abfertigungsregel einerseits und der Kapazitätsauslastung von Teilbereichen der Fertigung bzw. des gesamten Produktionssystems andererseits.

22) vgl. Frotscher, J., Ein Simulationsmodell für den Reparaturdienst, in: Schreiter, D. u. a. (Hrsg.), a.a.O., S. 127 ff.

23) vgl. Kress, H., Untersuchungen zur Bestimmung der optimalen Organisation von Instandhaltungsarbeiten an Fertigungsmaschinen bei Werkstättenfertigung anhand eines Simulationsmodells, Diss. München 1968.

24) vgl. Ordeltz, D., Instandhaltungsplanung, Wiesbaden 1973, S. 91 ff.

25) vgl. Scheer, A. W., Instandhaltungspolitik, Wiesbaden 1974, S. 206 ff.

1.1.2. Modelle für den Praxiseinsatz

In dieser Literaturbeschreibung erfahren Modelle, die fast ausschließlich für den praktischen Einsatz in Fertigungsbetrieben konzipiert sind, eine gesonderte Behandlung, da sie sich in ihrem Aufbau grundsätzlich von den zuvor beschriebenen Testmodellen unterscheiden. (Trotzdem wurden einige charakteristische Versuchsergebnisse solcher Systeme bereits im vorigen Abschnitt behandelt.)

In der Praxis ist die Feinplanung in ein umfassendes Terminplanungssystem eingebettet. So entwickelte Ackermann²⁶⁾ eine Prioritätsregel, die speziell auf die Rückwärtsterminierung von Aufträgen abgestimmt war. (Seine Konzeption führte nicht zu einem Einsatz in der Praxis.) LeGrande²⁷⁾ standen Daten aus einem Fertigungsbetrieb zur Verfügung, für die er eine passende Prioritätsregel suchte. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen entstand das Planungssystem für die Hughes Aircraft Company²⁸⁾. Eine vergleichende Studie beschreibt dieses System zusammen mit weiteren Realisierungen bei Texas Instruments, Fairfield Manufacturing Company und Western Electric Company²⁹⁾. Auch das

26) vgl. Ackermann, S. S., a.a.O.

27) vgl. LeGrande, E., The Development of a Factory Simulation System Using Actual Operating Data, Management Technology 3 (1963), S. 1 ff.

28) vgl. Bulkin, M. H., Colley, J. L. und Steinhoff jr., H. W., Load Forecasting, Priority Sequencing and Simulation in a Job Shop Control System, Management Science 13 (1966), S. 8-29 ff.

29) vgl. Moodie, C. L. und Novotny, D. J., Computer Scheduling and Control Systems for Discrete Part Production, Journal of Industrial Engineering 19 (1968), S. 336 ff.

Simulationsmodell von Berr und Papendieck³⁰⁾ ist auf den Praxisfall der Serienfertigung zugeschnitten, wobei die Planung von Montagevorgängen einbezogen wurde.

Insbesondere sei auf die zahlreichen Modularprogramme von EDV-Herstellern und deren vielfältige Abwandlungen von Benutzerseite hingewiesen. Eine vergleichende Übersicht bringt Kinzer³¹⁾. Neuere Entwicklungen, insbesondere COPICS von IBM³²⁾ oder ELPROSKO 4 der Krupp-Gemeinschaftsbetriebe³³⁾, bieten die Möglichkeit, innerhalb eines Planungssystems direkt mit dem Computer zu korrespondieren.

1.1.3. Modelle als Versuchsfeld für die Anwendung geeigneter Programmiersprachen

Die ersten hier erwähnten Simulationsprogramme waren in Maschinensprache geschrieben und deshalb zwangsläufig relativ einfach aufgebaut.

Mit der Einführung problemorientierter Programmiersprachen Anfang der 60er-Jahre wurden spezielle Simulationssprachen entwickelt (meist auf FORTRAN-Basis)³⁴⁾.

30) vgl. Berr, U. und Papendieck, A. J., a.a.O.

31) vgl. Kinzer, D., Fertigungssteuerung mit Modularprogrammen, Berlin - Köln - Frankfurt/M. 1972

32) vgl. IBM (Hrsg.), COPICS Communication Oriented Production Information and Control System, Kapitel 6: Fertigungs- und Kapazitätsplanung, IBM Form E 12-1234-0.

33) vgl. Krupp-Gemeinschaftsbetriebe (Hrsg.), ELPROSKO 4, Elektronisches Produktionssteuerungs- und Kommunikationssystem, Arbeitspapier anlässlich einer Tagung vom 20.3.1975 in Essen.

34) Eine zusammenfassende Übersicht gibt: Koxholt, R., Die Simulation - ein Hilfsmittel der Unternehmensforschung, München - Wien 1967, S. 91 ff.

Niedereichholz ³⁵⁾ und Schmitz/Minnemann ³⁶⁾ testeten die Eignung der GPSS-Sprache für Werkstatt-Simulationsmodelle.

Eine bemerkenswerte Veröffentlichung stellt die RAND-Studie von Oldfather u. a. ³⁷⁾ dar. Auf einer höheren Programmierenebene wurde mit Hilfe der Simulationssprache SIMSCRIPT ein Programmgenerator geschaffen. Dabei ist vom Anwender mit Hilfe von Checklisten zunächst die gewünschte Eigenschaft des Werkstatt-Simulationsmodells zu definieren und auf Lochkarten zu Übertragen. Ein "Generator"-Programm sucht daraufhin aus einem vorgegebenen Modulbestand die Bausteine aus, die für das Programm benötigt werden. Schließlich bindet ein "Editor" diese Programmteile zu einem lauffähigen, dem Benutzerwunsch entsprechenden Simulationsprogramm zusammen.

Dieses System dient in erster Linie als Versuchsfeld für den Einsatz des entwickelten Programmgenerators und als Demonstrationsobjekt für seine Funktionsweise. Die wesentlichen Vorteile dieses Prinzips und seines Einsatzes für Werkstatt-Simulationsmodelle liegen darin, möglichst viele Werkstattbedingungen - auch diejenigen, die langfristig festliegen - abzudecken. Jedoch sind auf der Liste der zu setzenden Ausgangsparameter weder die Anordnung von Maschinen noch die langfristige Dimensionierung der Maschinen- und Zwischenlagerkapazität zu finden. Auch läßt das Programm wich-

35) vgl. Niedereichholz, J., Zur Simulation statischer Job Shop Modelle mit GPSS, Elektronische Datenverarbeitung 12 (1970), S. 394 ff.

36) vgl. Schmitz, P. und Minnemann, J., Ein GPSS-Programm zur Auftragsfertigung bei zeitabhängiger Priorität der Aufträge, Angewandte Informatik 13 (1971), S. 69 ff.

37) vgl. Oldfather, P. M. u. a., Programming by Questionnaire: The Job Shop Simulation Program Generator, RAND Corporation Memorandum RM-5162-PR, Santa Monica (Cal.) 1967.

tige Elemente wie die Kombination der zahlreichen angebotenen Prioritätsregeln und die Berücksichtigung von Werkstattkosten vermissen. Überdies sollten gerade relativ komplexe Modelle die Möglichkeit bieten, in direkter Verbindung mit dem Rechner arbeiten zu können, um bei nicht plausiblen Zwischenergebnissen den Simulationslauf abbrechen, die offensichtlich falschen Ausgangsannahmen ändern und einen neuen Simulationslauf starten zu können.

1.1.4. Ein Modell für den Einsatz im Computerunterstützten Unterricht

Unter anderen Zielsetzungen entstand PROSIM³⁸⁾. Es handelt sich um ein Lehrprogramm für Studenten, mit dessen Hilfe Entscheidungen auf den folgenden Gebieten getroffen werden können: Kapazitätsplanung, Ablaufplanung, Materialdisposition, Qualitätskontrolle und Anlageninstandhaltung. Das Modell weist keine stochastischen Elemente auf. Der Student ist nicht direkt mit dem Computer verbunden.

1.1.5. Modelle zur Erforschung des menschlichen Entscheidungsverhaltens

Eine weitere Gruppe von Modellen, die darauf abzielen, das Entscheidungsverhalten von Studenten und Praktikern zu testen und zu beurteilen, soll in diesem Abschnitt eine gesonderte Behandlung erfahren.

Als Grundlage dienten meist Modelle über den relativ eng begrenzten Teilbereich der Reihenfolgeplanung, da dieses Gebiet besonders geeignet ist für den Vergleich automatischer Vorrangregeln mit dem schrittweisen Vorgehen bei manueller Einplanung.

38) vgl. Greenlaw, P. S. und Hottenstein, M. P., PROSIM: A Production Management Simulation, Scranton 1969; Mize, J. H. u. a., PROSIM V: Administrator's Manual: Production System Simulator, Englewood Cliffs (N. J.) 1971; Kroll, D. E., PROSIM W: A Production System Simulator, in: Highland, H. J. (Hrsg.), Winter Simulation Conference, Washington 1974, S. 229 ff.

Aus dem Bereich der Textilindustrie entstammt das Modell von Hurst u. a.³⁹⁾, die versuchten, das Verhalten des Produktionsplaners zu imitieren und in eine geeignete Prioritätsregel zu kleiden. Ein anschließender Vergleich zwischen manuellem und automatischem Planungsverhalten zeigte, in welchem Maße sich solche der menschlichen Vorgehensweise nachgebildete Algorithmen als Kontrollinstrumente für die täglichen Dispositionsaufgaben eignen. Mit derselben Zielsetzung entstand die Arbeit von Fox u. a.⁴⁰⁾, die ebenfalls bewiesen, daß das menschliche Planungsverhalten in relativ einfachen Modellen abzubilden ist.

Im Gegensatz dazu entstanden Simulatoren mit dem Ziel, für den Menschen eine "künstliche" Umgebung zu schaffen, innerhalb der sich sein Entscheidungsverhalten untersuchen ließ. Auf detaillierte Analysen der bisher praktizierten manuellen Eingabe stützte sich die Untersuchung von Bainbridge u. a.⁴¹⁾, die ebenfalls auf die Konstruktion einer bestimmten Planungsvorschrift abzielte.

Weitere Arbeiten schlagen Möglichkeiten vor, wie sich Planungsmodelle bzw. deren Handhabung vereinfachen lassen, sei es durch ihre Konzeption als Dialogmodell⁴²⁾, durch Vereinfachung des

39) vgl. Hurst, E. G. und McNamara, A. B., Heuristic Scheduling in a Woolen Mill, Management Science 14 (1967), S. 8-182 ff.

40) vgl. Fox, P. D. und Kriebel, C. H., An Empirical Study of Scheduling Decision Behavior, Journal of Industrial Engineering 18 (1967), S. 354 ff.

41) Bainbridge, L. u. a., A Study of Run-Time Human Decision Making Using a Plant Simulator, Operational Research Quarterly 19 (1968), S. 91 ff.

42) vgl. Ferguson, R. und Jones, C., A Computer-Aided Decision System, Management Science 15 (1968), S. 550 ff.;

Chervany, N. L. und Dickson, G. W., An Experimental Evaluation of Information Overload in a Production Environment, Management Science 20 (1974), S. 1335 ff.;

Smith, H. T. und Crabtree, R. G., Interactive Planning: A Study of Computer Aiding in the Execution of a Simulated Scheduling Task, International Journal of Man-Machine-Studies 7 (1975), S. 213 ff.

Planungsverfahren selbst ⁴³⁾ oder dadurch, daß spezielle Planungshilfen zur Verfügung gestellt werden ⁴⁴⁾.

Die Arbeit von Chervany/Dickson stellt ein Drei-Produkte-drei-Maschinen-Modell dar, bei dem jedem Produkt eine spezielle Maschine zugeordnet ist. Es stellt sich lediglich das Problem der Zuordnung des zwischen den Maschinen austauschbaren Personals. Die übrigen Arbeiten befassen sich mit der klassischen Aufgabe des "Job-Shop-Scheduling".

1.1.6. Der Sonderfall eines materialflußorientierten Modells

Ein den Verhältnissen eines deutschen Stahlunternehmens nachgebildetes materialflußorientiertes Simulationsmodell läßt sich schlecht in die verwendete Systematik einreihen ⁴⁵⁾. Dort werden wichtige Einflußgrößen sowie Kostenkomponenten beschrieben, die im Rahmen eines solchen Modells zu berücksichtigen sind. Wichtige Elemente daraus wurden zusammen mit Ideen aus dem Grundmodell I ⁴⁶⁾ als Anregung für die vorliegende Arbeit übernommen.

43) vgl. Nicholson, T. A. J. und Pullen, R. D., A Practical Control System for Production Schedules, International Journal of Production Research 9 (1971), S. 219 ff.

44) vgl. Smith, H. T. und Crabtree, R. G., a.a.O.

45) vgl. Mertens, P. und Griesse, J., Industrielle Datenverarbeitung, Band 2, Wiesbaden 1972, S. 226 ff.

46) vgl. Mertens, P., Industrielle Datenverarbeitung, Band 1, 2. Aufl., Wiesbaden 1972, S. 230 ff.

1.2. Literaturliste

Testmodelle

Modelle zur Ablaufplanung

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Jackson	1957	Entwicklung und Test einer Variante der KFZ-Regel mit dem Ziel guter Termineinhaltung
Baker/ Dzielinski	1960	Test verschiedener, insbesondere zeitabhängiger Prioritätsregeln im Hinblick auf Durchlaufzeiten
Rowe	1960	Test unterschiedlicher Prioritätsregeln unter verschiedenen Kapazitätsausnutzungsgraden
Allen	1963	Vergleich von KFZ- und LFZ-Regel im Hinblick auf Kapazitätsschwankungen in der Fertigung
Ackermann	1963	Wie Jackson, Rückwärtsterminierung der Aufträge, Test von hierzu geeigneten Varianten der KFZ-Regel
LeGrande	1963	Vergleich von Prioritätsregeln; Eignungstests für den praktischen Einsatz
Conway	1964	Entwicklung neuer Prioritätsregeln mit umfangreichen Vergleichstests unter besonderer Berücksichtigung von Kombinationsmöglichkeiten
Carroll	1965	Einbeziehung von Verspätungskosten in eine neu konstruierte Prioritätsregel einschließlich Vergleichstests
Conway/Maxwell Miller	1967	Theoretische Erörterung des Reihenfolgeproblems, Vergleich von Prioritätsregeln, gegenüber früher erweiterte Versuchsreihen
Oldfather u. a.	1967	Aufbau eines komplexen Werkstattsimulationsmodells in Verbindung mit der Anwendung eines Programmgenerators
Falkenhausen	1968	Literaturstudie: Vergleich der Simulationsmodelle der Gruppe Conway und der Hughes Aircraft Company
Keck	1968	Literaturstudie: Gegenüberstellung der bis ca. 1964 entstandenen Simulationsmodelle zur Ablaufplanung
Baker	1968	Vergleich von Varianten der Kürzeste-Rüstzeit-Regel bei einstufiger Fertigung und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Gräßler	1968	Test von Prioritätsregeln unter Zugrundelegung verschiedener Fertigungsprinzipien (Werkstattprinzip, Fließprinzip und Zwischenform)
Hollier	1968	Test von Prioritätsregeln unter Einbeziehung reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten
Berr/ Papendieck	1970	Entwicklung eines Planungsmodells für einen Betrieb der Serienfertigung unter der Zielsetzung möglichst geringer Herstellungskosten
Wilbrecht/ Prescott	1970	Test der Kürzeste-Rüstzeit-Regel bei mehrstufiger Fertigung und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten in Kombination mit der KFZ-Regel
Buzi	1971	Versuch einer systematischen Bewertung der Güte zeitabhängiger Prioritätsregeln anhand spezieller Zielfunktionen
Müller	1972	Simultane Berücksichtigung der Ziele minimaler Durchlaufzeiten und minimaler Lagerkosten
Mertens	1972	Beschreibung eines Grundmodells für die Ablaufplanung unter besonderer Berücksichtigung einfacher und kombinierter Prioritätsregeln
Seelbach	1973	Test einer speziellen Regel zur simultanen Minimierung von Sortenwechsel- und Fehlmengenkosten
Cantellow	1973	Auswirkung von Maßnahmen der Kapazitätsabstimmung und Losgrößenvariation auf Maschinen-, Lohn- und Kapitalbindungskosten sowie Durchlaufzeit
Hoch	1973	Zusammenfassende Studie des aktuellen Forschungsstandes in der Reihenfolgeplanung
Leigh	1974	Verbesserung von Kapazitätsauslastung, Kapitalbindung und Durchlaufzeit durch Variation der Personalkapazität und -zuordnung
Rueger	1974	Übersicht über Verfahren der Reihenfolgeplanung, bei denen reihenfolgeabhängige Rüstzeiten berücksichtigt werden
New	1975	Kritische Nutzen-Kosten-Analyse insbesondere der statischen und dynamischen Prioritätsregeln

Modell zur Layoutplanung

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Fleischmann/ Saur	1973	Mehrstufiges Verfahren zum Test von Layout-Varianten anhand eines Ablaufplanungsmodells

Modelle zur Instandhaltungsplanung

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Vergin	1966	Test von Prioritätsregeln zur Abfertigung von Instandhaltungsaufträgen; Prioritätsregeln beziehen sich auf die Unterscheidung zwischen Schadens- und vorbeugenden Reparaturen
Frotscher	1968	Entwicklung eines Simulationsmodells zum Einsatz von Instandhaltungspersonal für Schadensreparaturen, deren Dauer zufallsabhängig ist
Kress	1968	Test unterschiedlicher Prioritätsregeln mit dem Ziel der Minimierung der Instandhaltungskosten; Maschinen enthalten mehrere Ausfallteile
Ordeltje	1973	Einfluß von Reparaturstrategien auf die Stillenderate, den Auslastungsgrad der Reparaturkapazitäten und den Ersatzteilverbrauch
Scheer	1974	Kombination von verschiedenen Ersatzstrategien, Instandhaltungskapazitäten und Abfertigungsregeln innerhalb eines komplexen Produktionssystems

Modelle für den Praxiseinsatz

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
LeGrande	1963	Test von Prioritätsregeln auf ihre Eignung für die Ablaufplanung bei der Hughes Aircraft Company
Bulkin/Colley/ Steinhoff	1966	Planungssystem für die El-Segundo-Division der Hughes Aircraft Company (vgl. LeGrande)
Moodie/ Novotny	1968	Vergleich von vier Planungssystemen: Hughes Aircraft, Texas Instruments, Fairfield Manufacturing Company, Western Electric Company

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Berr/ Papendieck	1970	Entwicklung eines Planungsmodells für einen Betrieb der Serienfertigung
Kinzer	1972	Zusammenfassende Studie über Modularprogramme zur Kapazitätsterminierung
IBM	1972/ 73	Modularprogramm zur Kapazitätsterminierung, das die Möglichkeit bietet, mit dem Rechner direkt zu korrespondieren (COPICS)
Krupp-Gemein- schaftsbetriebe	1975	Für den speziellen Einsatz in Krupp-Betrieben entwickeltes Modell (ELPROSKO), das ähnliche Elemente wie COPICS aufweist

Modelle als Versuchsfeld für die Anwendung geeigneter Programmiersprachen

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Oldfather u. a.	1967	Aufbau eines Programmgenerators auf Basis der SIMSCRIPT-Sprache einschließlich der Beschreibung seiner Arbeitsweise
Niedereichholz	1970	Eignungstest der GPSS-Sprache für statische Flow-Shop-Probleme
Schmitz/ Minnemann	1971	Eignungstest der GPSS-Sprache für dynamische Simulationsmodelle

Ein Modell für den Einsatz im Computerunterstützten Unterricht

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Greenlaw/ Hottenstein	1969	Lösung von Entscheidungsproblemen im Produktionsbereich mit Hilfe des Lehrprogramms PROSIM

Modelle zur Erforschung des menschlichen Entscheidungsverhaltens

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Hurst/ McNamara	1967	Entwicklung eines speziell auf das Verhalten des Produktionsplaners zugeschnittenen Kontrollinstrumentes in einem Betrieb der Textilindustrie
Fox/ Kriebel	1967	Studie über die Vorgehensweise bei der manuellen Ablaufplanung und Entwicklung eines entsprechenden Modells für einen Betrieb der Verpackungsindustrie

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Bainbridge u. a.	1968	Umfangreiche Analysen des menschlichen Verhaltens bei der Prozeßsteuerung in der Stahlindustrie
Ferguson/ Jones	1968	Entwicklung eines Simulationsmodells zur Ablaufplanung, Verhaltenstest an Praktikern und Universitätsangehörigen
Nicholson/ Pullen	1971	Aufbau eines einfachen Programms für den Produktionsplaner zum Test verschiedener Planungsalternativen
Chervany/ Dickson	1974	Untersuchung über den Einfluß der Informationsmenge auf das Entscheidungsverhalten und die Qualität der Ergebnisse anhand eines einfachen Simulationsmodells
Smith/ Crabtree	1975	Test eines Simulationsmodells insbesondere daraufhin, ob eingebaute Prognosemöglichkeiten den Entscheidungsprozeß beschleunigen und die Qualität der Ergebnisse verbessern können

Der Sonderfall eines materialflußorientierten Modells

<u>Name</u>	<u>Jahr</u>	<u>Kurze Charakteristik</u>
Mertens/ Griese	1972	Aufbau des Konzepts eines materialflußorientierten Simulationsmodells für ein Unternehmen der Stahlindustrie

2. Problemstellung und daraus abgeleitete Anforderungen an ein Werkstatt-Simulations-System (WSS)

Im Rahmen der Ablaufplanung wird die Reihenfolge festgelegt, in der Aufträge an den einzelnen Maschinen zu bearbeiten sind. Während vollanalytische Modelle sich mit der Suche nach der optimalen Reihenfolge der Auftragsbearbeitung befassen, dienen Simulationsmodelle lediglich zum Auffinden allgemeingültiger Abfertigungsvorschriften. Solche Prioritätsregeln betreffen den Bereich kurzfristiger Dispositionen und sind deshalb zeitlichen Schwankungen in der Fertigung leicht anzupassen.

Hinzu kommen weitere Entscheidungsvariable, die sich stärker auf die Güte von Ablaufplänen auswirken können als die Wahl der einen oder anderen Variante einer Vorrangregel.

Drei Beispiele sollen dies verdeutlichen:

- (1) Es sei ein Betrieb der Kleinserienfertigung angenommen, bei dem die Produkte einen Fertigungsfluß mit ähnlichem Richtungssinn aufweisen. Außerdem seien die Maschinengruppen ungünstig angeordnet. Auch wenn die für diesen Fall günstigste Prioritätsregel ausgesucht wurde, handelt es sich bei einer solchen Lösung lediglich um ein schlechtes Suboptimum. Erst durch ein besseres Layout können Transportkosten und -zeiten eingespart werden. Nach einer Veränderung der Maschinenanordnung ist es evtl. notwendig, die gewählte - unter den früheren Bedingungen annähernd optimale - Prioritätsregel den veränderten Werkstattbedingungen anzupassen.
- (2) In einem weiteren Beispiel handle es sich um einen Betrieb der Einzelfertigung, in dem eine bestimmte Maschinengruppe sehr stark beansprucht und somit zur Engpaßmaschine wird. Eine geeignete Prioritätsregel ist imstande, Umrüstzeiten, die an dieser Maschinengruppe auftreten, zu reduzieren. Zusätzliche Maßnahmen wie solche der Personalzuordnung (Arbeiter werden von anderen Maschinengruppen abgezogen und der Engpaßmaschine zugeteilt) oder des Maschineneinsatzes (Maschinen anderer Maschinengruppen werden außer Betrieb gesetzt, damit vor dem Engpaß, der ohnehin

die Produktionsgeschwindigkeit bestimmt, keine unnötig großen Warteschlangen entstehen) führen jedoch in mindestens ebenso hohem Maße zu einem Kapazitätsausgleich innerhalb der Werkstatt. Ein gleichmäßiger Produktionsfluß kann wiederum dazu führen, daß die Vorrangregel auf die geänderten Kapazitätsbedingungen abzustimmen ist.

- (3) Schließlich führe in einem dritten Beispiel die besonders ausgeprägte Störanfälligkeit der Maschinengruppen zu langen Wartezeiten der Aufträge an allen Stationen. Die dadurch bedingte hohe Kapitalbindung in der Fertigung wird durch eine spezielle Prioritätsregel reduziert. Maßnahmen zur vorbeugenden Instandhaltung könnten jedoch in diesem Fall zu besseren Ergebnissen führen, wodurch sich eine Prioritätsregel zur Minimierung der Kapitalbindung erübrigen würde.

Diese Beispiele zeigen einige wichtige Entscheidungen (Layoutplanung, Personalzuordnung, Maschineneinsatz und Maßnahmen zur vorbeugenden Instandhaltung), die sich auf die Ergebnisse der Ablaufplanung auswirken (vgl. schematische Darstellung von Entscheidungsproblemen in Abschnitt 3.1.). Auch sind in den Beispielen einige Zielvorstellungen angedeutet, unter denen Entscheidungen getroffen werden können (Minimierung von Transportkosten und -zeiten, Maximierung der Kapazitätsauslastung, Minimierung von Wartezeiten und Kapitalbindung; vgl. Abschnitt 3.2.5.).

Aus dieser Wechselwirkung zwischen Entscheidungsvariablen und angestrebten Zielen resultieren folgende Problemstellungen:

- (1) Einfluß einer Aktionsvariablen auf konkrete Zielvorstellungen (z.B. Auswirkung eines veränderten Instandhaltungsintervalles auf die Termintreue der Aufträge).
- (2) Kombierter Einsatz von Entscheidungsvariablen und ihre Wirkung auf bestimmte Ziele (z.B. Einbeziehung mehrerer Kriterien in eine kombinierte dynamische Prioritätsregel, Maßnahmen der Personalzuordnung und ihre Auswirkungen auf die Kapazitätsauslastung in der Fertigung).

- (3) Einfluß eines kombinierten Einsatzes von Aktionsparametern auf mehrere Zielsetzungen
(z.B. Konsequenz verschiedener Kriterienkombinationen innerhalb einer kombinierten Prioritätsregel sowohl für die Anzahl abgeschlossener Aufträge als auch für die Kapazitätsauslastung in der Fertigung).
- (4) Anpassungsmöglichkeit von Aktionsvariablen an Schwankungen in der Fertigung im Zeitablauf
(z.B. Wechsel von einer Prioritätsregel, die hohe Kapazitätsauslastung gewährleistet, zu einer solchen, die die Anzahl der Terminverspätungen reduziert, Maßnahmen zur Personalzuordnung bzw. des Maschineneinsatzes).
- (5) Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Bedingungen in der Fertigung im Zusammenhang mit den in Punkt (1) bis (4) genannten Problemstellungen
(z.B. Eignungstest von Prioritätsregeln bei Werkstatt- oder Reihenfertigung).

Weder Studenten noch Praktiker haben jedoch die Möglichkeit, diese Wirkungszusammenhänge in allen ihren Konsequenzen zu untersuchen. Studenten sind allenfalls theoretische Darstellungen bekannt, die auf Modellen beruhen, deren Prämissen sie meist nicht im Detail kennen. Praktiker haben reichhaltigere Erfahrungen darüber gesammelt, wie sich bestimmte, einmal eingeschlagene Strategien auf den Betriebsablauf auswirken. Meist ist es jedoch schwierig oder gar riskant, innerhalb eines konkreten Produktionsbereichs Experimente durchzuführen, um so bestimmte bisher verfolgte Politiken zu überprüfen.

Deshalb stellt sich als Hauptproblem weder die Schaffung zusätzlicher Lösungswege zur Ablaufplanung (vgl. Literaturübersicht) noch der Aufbau eines weiteren Modularprogramms zum praktischen Einsatz in Betrieben der Fertigungsindustrie (vgl. Literaturübersicht).

Vielmehr soll Studenten und Praktikern ein Instrument zur Verfügung gestellt werden, mit dessen Hilfe sie eigene Produktionsbedingungen schaffen und in Kenntnis dieser Prämissen ihre Ergebnisse validieren können. Dabei besteht insbesondere für den Praktiker die Möglichkeit, ohne jegliches Risiko auch angeblich unkonventionelle Maßnahmen einzuleiten und deren Auswirkungen unter verschiedenen Bedingungen zu testen.

Ein Modell, das für diese Zielsetzung konzipiert ist, muß besonderen Anforderungen sowohl hinsichtlich seines sachlichen Inhalts als auch seiner Handhabung genügen:

- (1) Zum Studium des Zusammenwirkens verschiedener Einflußgrößen ist nur ein Simultanmodell geeignet.
- (2) Darin muß der Zeitablauf, in dem sich Ereignisse und Aktivitäten abspielen, möglichst wirklichkeitsgetreu nachgebildet werden, so daß steuernde Eingriffe von außen während der Simulation möglich sind.
- (3) Produktionsabläufe sind oft Zufallsschwankungen unterworfen und daher nicht immer eindeutig vorhersehbar. Das Modell muß in der Lage sein, die wichtigsten stochastischen Elemente, mit denen solche Vorgänge behaftet sind, zu berücksichtigen.
- (4) Das System soll möglichst wenige Restriktionen enthalten; es soll flexibel und ausbaufähig sein (z.B. Berücksichtigung unterschiedlicher Fertigungsprinzipien, spätere Einbeziehung weiterer Bausteine).
- (5) Durch die direkte Verbindung des Menschen mit dem Rechner können innerhalb eines Mensch-Maschine-Dialogs Entscheidungen am besten getroffen und geprüft sowie Ergebnisse anschaulich dargestellt werden.
- (6) Das Modell soll in Aufbau und Inhalt möglichst übersichtlich sein. Insbesondere muß darauf geachtet werden, daß trotz Zufallsschwankungen im Simulationsablauf und hohem Komplexitätsgrad des Systems Ergebnisse erklärbar bleiben.

- (7) Der Benutzer muß ohne spezifische EDV-Kenntnisse mit dem Dialogmodell arbeiten können. "Anfänger" sollen vom Computer bei ihren Testarbeiten angeleitet und geführt werden. "Fortgeschrittene" müssen die Möglichkeit erhalten, durch weitgehende Wahlfreiheit im Dialogablauf mit einem Minimum an Zeitbedarf möglichst viele Varianten durchspielen zu können.

Hierzu bot sich die Entwicklung eines On-line-Simulationssystems an, dessen Konzeption im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

3. Konzeption eines Modells zur Simulation von Werkstattabläufen

3.1. Grundstruktur des Modells

Der Modellkern (vgl. Abb. 1) besteht aus einem Simulationsverfahren zur Ablaufplanung. Wesentliche Bausteine davon sind Prioritätsregeln und ein Kostenmodul (vgl. Abschnitt 3.2.1.7. bzw. 3.2.4.).

Prioritätsregeln dienen dazu, aus einer vorhandenen Warteschlange vor einer Maschinengruppe entsprechend bestimmter Kriterien (Aktionsparameter) Aufträge zur Bearbeitung auszusuchen. Eine solche Auswahl erfolgt immer dann, wenn nach Beendigung eines anderen Auftrags die betreffende Maschinengruppe frei geworden ist.

Ein Kostenmodul soll alle im Rahmen des Simulationsablaufs anfallenden Kostenfaktoren erfassen und mitführen. Im Ergebnisteil werden diese dann den Erträgen durch abgeschlossene Aufträge gegenübergestellt (vgl. Abschnitt 4.4.4.).

Um den Modellkern sind zwölf Moduln gruppiert, deren Ergebnisse als Daten in die Ablaufplanung eingehen. Jeder dieser Bausteine repräsentiert ein Entscheidungsproblem (vgl. genaue Darstellung der Entscheidungsebenen in Abschnitt 4.2.3. und 4.2.4.).

Der obere Teil von Abb. 1 beschreibt die Ebene der strategischen Entscheidungen, auf der ein Produktionsbetrieb neu aufgebaut werden kann. Man kann diese Ebene auch als einen Teil der Programmgenerierung auffassen, wo vom Benutzer die Werkstattbedingungen definiert werden, innerhalb welcher sich das anschließend simulierte Produktionsgeschehen abspielen soll.

Im einzelnen sind hier folgende Entscheidungen zu treffen:

(1) Layout.

Sowohl bei der Einzel- als auch bei der Massenfertigung erübrigen sich besondere Modelle der Layoutplanung. Im ersten Fall ist das Auffinden eines Optimums unmöglich, da nicht für alle Flußrichtungen der Auftragsbearbeitung gleichermaßen ein günstiges Layout ermittelt werden kann. Im Fall der Massenfertigung ist

die Produktion ohnehin nach dem Fließprinzip ausgerichtet:
die Frage nach dem optimalen Layout ist bereits beantwortet.

Probleme der Maschinenaufstellung treten hauptsächlich in Betrieben der Kleinserienfertigung auf, die nach dem Werkstättenprinzip arbeiten. Dabei stellt sich im wesentlichen die Aufgabe, das Layout auf eine gegebene Auftragsstruktur und damit auf die hauptsächlichliche Flußrichtung der Aufträge auszurichten.

(2) Kapazität von Maschinengruppen.

Ausgehend von den kapazitiven Anforderungen eines durchschnittlich in der Werkstatt zu fertigenden Auftragsprofils kann je Maschinengruppe eine bestimmte Dimensionierung des Kapazitätsquerschnittes vorgenommen werden. Für Maschinengruppen, in denen gleichartige Maschinen zusammengefaßt werden, bedeutet dies die Bestimmung der Anzahl von Maschinen je Maschinengruppe.

(3) Kapazität von Zwischenlagern.

Durch die Kapazität von Zwischenlagern wird die maximal zulässige Länge der Warteschlange vor jeder Maschinengruppe begrenzt. In jeder Werkstatt ist je nach Struktur des Ablaufplanungsproblems eine bestimmte Mindestgröße für jedes Pufferlager notwendig, da die Bildung von Warteschlangen zulässig sein muß.

(4) Personalbestand insgesamt in der Werkstatt.

Für automatisierte Werkstätten, in denen die Fertigungsabläufe als solche keine Arbeitskräfte erfordern, berücksichtigt das Modell lediglich Facharbeiter, die für das Rüsten von Maschinen zuständig sind. Durch die Festlegung des Personalbestandes wird die gesamte Kapazität der Werkstatt entscheidend mitbestimmt.

(5) Auftragszusammensetzung.

Im Rahmen einer Modellgenerierung können unterschiedliche Auftragsprofile aufgebaut werden, die die Werkstatt durchlaufen.

(6) Soll-Durchlaufzeiten (Terminfixierung).

Termine werden der Werkstatt meist von außen vorgegeben. Zumindest sind sie für den Werkstattbereich kurzfristig nicht zu ändern.

Ihre Bestimmung erfolgt durch die einfache Addition der hier gewählten bzw. ermittelten Konstanten zu der jeweiligen Ankunftszeit eines Auftrags in der Werkstatt. Entscheidungsvariable sind entweder die Soll-Durchlaufzeiten selbst oder ein Faktor zu ihrer Berechnung aus den Fertigungszeiten.

Die untere Hälfte der Darstellung betrifft die Ebene der taktischen Entscheidungen. Hier treten im einzelnen folgende Entscheidungsprobleme auf:

(1) Losgrößen.

Die Stückzahl, in der ein Teil gefertigt werden soll, unterliegt auf der unteren Ebene der Einzelteilefertigung gewöhnlich nicht den Bedingungen, die von der Vertriebsseite her gesetzt werden. Vielmehr ist von einem konstanten verbrauchsgesteuerten Bedarf auszugehen, der lediglich Zufallsschwankungen unterworfen ist. Damit steht die Möglichkeit offen, Losgrößen im Hinblick auf werkstattbezogene Zielgrößen autonom zu variieren.

(2) Bearbeitungsreihenfolgen.

Aufträge durchlaufen entsprechend ihren Arbeitsplänen die Maschinengruppen in einer bestimmten vorgegebenen Reihenfolge. Viele Arbeitspläne lassen jedoch Varianten zu, die es ermöglichen, gegebenenfalls Engpaßmaschinen zu umgehen.

(3) Maschineneinsatz.

Auf dieser Entscheidungsebene ist es ebenfalls möglich, Kapazitätsentscheidungen über Maschinengruppen zu treffen. Diese quantitativen Anpassungsmaßnahmen können sich jedoch nur im Rahmen der langfristig gesetzten Kapazitätsquerschnitte bewegen.

(4) Maßnahmen zur vorbeugenden Instandhaltung.

Aus der Unregelmäßigkeit, die das Ausfallverhalten von Anlagenteilen aufweist, ergibt sich das Problem, möglichst günstige Reparaturstrategien herauszufinden. An dieser Stelle ist jedoch einzuräumen, daß der Planungshorizont bei der Ablaufplanung selten größer ist als einige Tage, während die Intervalle

zwischen vorbeugenden Instandhaltungsmaßnahmen normalerweise ein vielfaches davon betragen. Trotzdem tauchen auch im zeitlichen Rahmen der Ablaufplanung Instandhaltungsprobleme auf, beispielsweise bei der Überwachung hochempfindlicher Meßwerkzeuge und -geräte.

(5) Personalbestand und -zuordnung.

Bei Maschinengruppen, die eine starke Ähnlichkeit hinsichtlich der ausgeführten Arbeitsvorgänge aufweisen, ist meist auch das Einstellpersonal unter den Maschinengruppen austauschbar. In diesem Fall stellt sich insbesondere das Problem der Personalzuordnung an den einzelnen Maschinengruppen. Damit ergibt sich - neben dem Maschineneinsatz (vgl. Punkt (3)) - eine weitere Möglichkeit der quantitativen Anpassung.

Ist das Personal zwischen Maschinengruppen nicht austauschbar, so ist ausschließlich die auf der strategischen Ebene getroffene Entscheidung ausschlaggebend. Auf taktischer Ebene können keine Personalentscheidungen mehr erfolgen.

(Für Fertigungsstätten, in denen bei der Werkstückbearbeitung Bedienungskräfte erforderlich sind, können personelle Restriktionen im Zusammenhang mit dem Maschineneinsatz in das Modell eingehen. Sind nämlich weniger Bedienungskräfte als Maschinen vorhanden, besteht die Möglichkeit, in das Modell nur die Maschinenkapazität einzusetzen, für die Bedienungspersonal zur Verfügung steht.)

(6) Prioritätsregelbestimmung.

In die Prioritätensteuerung des Ablaufplanungsmodells geht entweder eine einfach aufgebaute First-come-first-served-Regel oder eine kombinierte dynamische Prioritätsregel ein. Sie kann in diesem Teil benutzerindividuell aufgebaut werden, wobei verschiedene Prioritätskriterien mit Gewichten zu versehen sind.

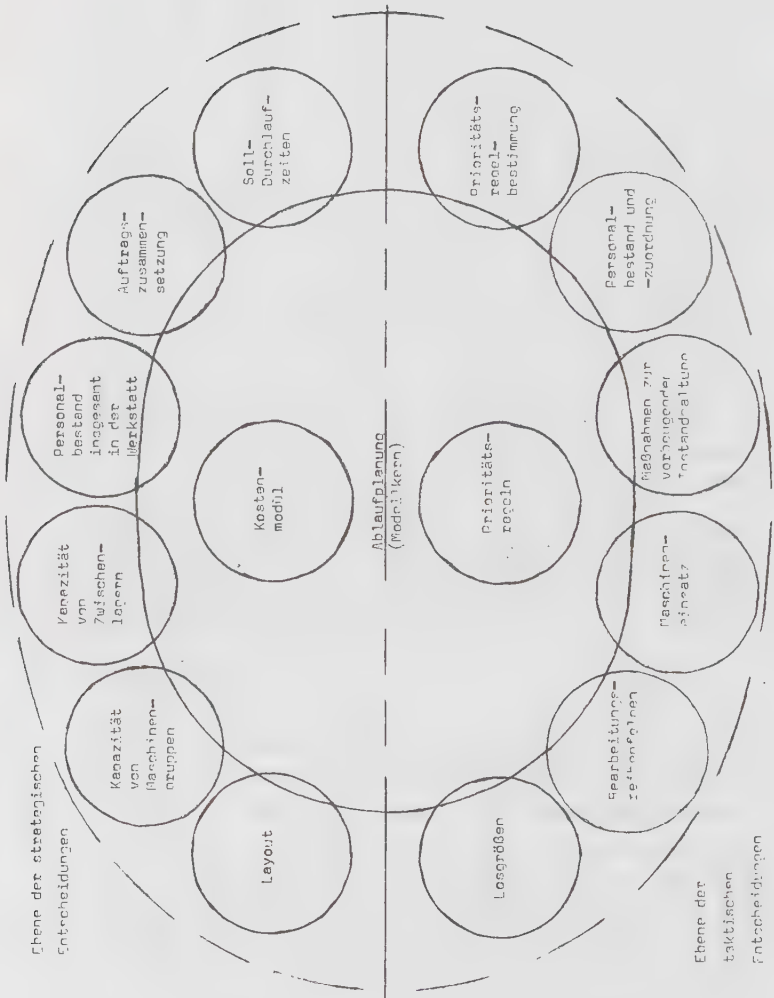


Abb. 1: Grundstruktur des Modells

3.2. Eigenschaften des Modells

3.2.1. Auftragsbezogene Eigenschaften

3.2.1.1. Ankunftsprozeß

Im Modell können sowohl statische als auch dynamische Ankunftsprozesse dargestellt werden. Bei statischen Prozessen befindet sich eine bestimmte Anzahl von Aufträgen zu Beginn der Simulation vor dem Werkstattsystem. Bei dynamischen Prozessen treffen die Aufträge im Zeitablauf entsprechend einer vorbestimmten Verteilung in der Werkstatt ein.

Auftragsanzahl bei statischen und durchschnittliche Zwischenankunftszeit bei dynamischen bzw. beides bei gemischten Prozessen sind Systemparameter (vgl. Abschnitt 4.2.1.).

3.2.1.2. Auftragszusammensetzung

Ein Produkt stellt eine bestimmte Ausprägung eines generierten Auftrages dar. (Die Begriffe "Produkt", "Auftragskategorie" und "Auftragsklasse" werden hier und in den folgenden Abschnitten synonym verwendet.)

Jeder Auftrag kann 9 Ausprägungen annehmen, für die jeweils Werte (Bearbeitungsreihenfolgen, Stückzeiten usw.) in den Stammdaten (vgl. Abschnitt 4.2.2.) gespeichert sind. Die Auftragszusammensetzung wird von der Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der gewisse Auftragskategorien in der Werkstatt eintreffen sollen.

In einem Beispiel sei angenommen, daß im Laufe der Simulationszeit 90 Aufträge generiert werden. Die Ankunftswahrscheinlichkeiten seien für alle 9 Auftragsklassen gleich. Somit ist die Menge der eintreffenden Aufträge bei idealer Zufallszahlenfolge aus je 10 Aufträgen jeder Kategorie zusammengesetzt.

3.2.1.3. Technologische Reihenfolgen

Die Reihenfolgen, in denen Produkte Maschinengruppen durchlaufen, werden als technologische Reihenfolgen, Bearbeitungsreihenfolgen oder Maschinenfolgen bezeichnet. Als Bestandteile der Stammdaten, insbesondere der Fertigungsvorschriften, gehen sie in das Modell ein, können dort jedoch im Dialog modifiziert werden.

Die Werkstatt besteht aus 9 Maschinengruppen. Von Produkten können maximal 9 Stationen f durchlaufen werden (vgl. Tab. 1, Fall 1). Die Reihenfolge, in der Maschinengruppen durchlaufen werden, ist beliebig (vgl. Tab. 1, Fall 2). Es brauchen nicht alle Maschinengruppen in einer Reihenfolge enthalten zu sein (vgl. Tab. 1, Fall 3). Die Rückkehr zu einer bereits durchlaufenen Maschine ist erlaubt (vgl. Tab. 1, Fall 4).

Im folgenden sind vier Zahlenbeispiele für Reihenfolgevektoren (b_f) aufgeführt. Dabei bedeuten das Element b_{fj} die Nummer der Maschinengruppe und f die Station innerhalb der Bearbeitungsreihenfolge entsprechend dem Fertigungsfortschritt.

		Fertigungsfortschritt →								
Beispiel	Station f	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Fall 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Fall 2	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	Fall 3	1	4	3	8	7	9	0	0	0
	Fall 4	1	4	3	8	7	9	4	1	0

Tab. 1: Beispiele zum Aufbau technologischer Reihenfolgen

Formal läßt sich die Reihenfolge für ein bestimmtes Produkt j folgendermaßen darstellen:

$$\underline{b} := (b_{ij}) = (b_{1j}, \dots, b_{m_j^p}, \dots, b_{9j})$$

wobei $b_{ij} \in \{0, \dots, 9\}$ und $1 \leq m_j^p \leq 9$ ⁴⁷⁾.

Für $i \leq m_j^p$ gilt: $b_{ij} > 0$, sonst: $b_{ij} = 0$.

m_j^p bedeutet die Anzahl der Stationen, die ein Produkt j durchläuft.

Faßt man mehrere Reihenfolgevektoren in eine Matrix zusammen, so lassen sich damit unterschiedliche Fertigungsprinzipien darstellen.

Der Spezialfall der reinen Reihenfertigung ("Flow Shop") ist z.B. durch für alle Produkte gleiche Reihenfolgevektoren charakterisiert (vgl. Tab. 2).

Station i \ Produkt j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5	7	9	3	1	0	0	0	0
2	5	7	9	3	1	0	0	0	0
.					.				
.					.				
.					.				
9	5	7	9	3	1	0	0	0	0

Tab. 2: Aufbau von Maschinenfolgen bei der Reihenfertigung

- 47) Die Schreibweise $x = 1, \dots, n$ soll heißen, daß die Zahlenfolge von 1 bis n durchlaufen wird, während bei der Schreibweise $x \in \{1, \dots, n\}$ beliebige Reihenfolge und beliebige Häufung der Zahlen zwischen 1 und n erlaubt ist. Dies gilt auch für spätere Abschnitte.

Zur Notationstechnik (vgl. Abschnitt 8.1. im Anhang): Anstelle von Hochzahlen, die zur Bezeichnung von Potenzen in der vorliegenden Symbolik grundsätzlich nicht vorkommen, sind erläuternde Parameter gesetzt. Sie dienen zur näheren Beschreibung der Basiswerte bzw. zu ihrer klareren Unterscheidung voneinander.

(Z.B. ist zwischen den Symbolen m_j^p , m_i^1 und m_i^2 deutlich zu unterscheiden: im ersten Fall handelt es sich um die Anzahl der Stationen eines Produkts - vgl. oben -, im zweiten um die Anzahl installierter und im dritten um die Anzahl tatsächlich eingesetzter Maschinen.) Außer zur Bezeichnung von Zeitpunkten (z.B. A_a) und von akkumulierten Werten aus der Simulation (z.B. CT) werden nur Kleinbuchstaben verwendet. Kostenelemente sind in griechischen Buchstaben dargestellt. Vektoren sind durch Unterstreichen des entsprechenden Symbols gekennzeichnet.

Damit ist

$$b_{f1} = b_{f2} = \dots = b_{f9} \quad \text{für alle } f = 1, \dots, 9.$$

Alle Zwischenformen zwischen dem theoretischen Fall völlig gegenläufiger Flußrichtungen und der Reihenfertigung können in das Modell eingehen.

3.2.1.4. Zeitkomponenten

Im vorliegenden Modell wird zwischen Rüst-, Stück-, Operations- und Fertigungszeiten unterschieden. Dabei sollen Stückzeiten für die Bearbeitungszeit eines Teils (Produktes), Operationszeiten für die eines Fertigungsloses und Fertigungszeiten für die Summe der Operationszeiten stehen.

3.2.1.4.1. Rüstzeiten

Rüstzeiten beziehen sich in ihrer ursprünglichen Form auf eine Arbeitseinheit, d.h. auf eine Maschine je Maschinengruppe i und eine dafür eingesetzte Arbeitskraft. Da in dem Modell reihenfolgeabhängige Rüstzeiten berücksichtigt werden, sind in den Stammdaten Zeiten gespeichert, die sich auf den Sortenwechsel beim Übergang von einem Produkt j_1 auf ein Produkt j_2 je Arbeitseinheit beziehen. Hierzu ist eine dreidimensionale Darstellung von der Form

$$(r_{i,j_1,j_2}) \quad \begin{array}{l} \text{mit } i = 1, \dots, 9 \text{ und} \\ j_1, j_2 = 1, \dots, 9 \end{array}$$

notwendig. Dadurch wird je Arbeitskraft die Rüstdauer beschrieben, die beim Wechsel von Produkt j_1 zum Produkt j_2 notwendig ist.

Da zwischen gleichen Produkten keine Rüstzeiten anfallen, gilt für

$$j_1 = j_2: \quad r_{i,j_1,j_2} = 0 \quad \text{für alle } i = 1, \dots, 9.$$

In derselben Form läßt sich auch der Spezialfall reihenfolgeunabhängiger Rüstzeiten darstellen:

$$r_{i,1,j_2} = r_{i,2,j_2} = \dots = r_{i,9,j_2} \quad \text{für alle } i = 1, \dots, 9 \\ \text{und } j_2 = 1, \dots, 9.$$

Die in den Fertigungsvorschriften enthaltenen Rüstzeiten beziehen sich auf eine Arbeitseinheit, während die in der Simulation zur Wirkung kommenden Zeitkomponenten (r_{i,j_1,j_2}^*) sowohl von der Anzahl der Arbeitskräfte (p_i^2) als auch der Anzahl der eingesetzten Maschinen (m_i^2) je Maschinengruppe abhängig sind.

Zur Berechnung von (r_{i,j_1,j_2}^*) liegen dem Modell folgende vereinfachende Annahmen zugrunde:

- Rüstzeiten verhalten sich proportional zur Kapazität der Maschinengruppen (Maschineneinsatz).
- Rüstzeiten sind solange umgekehrt proportional zur Anzahl der eingesetzten Arbeitskräfte, wie sie die Anzahl eingesetzter Maschinen je Maschinengruppe nicht übersteigt. Solange nämlich die Personalkapazität an den einzelnen Maschinengruppen kleiner oder gleich der Anzahl der zu rüstenden Maschinen ist, können Rüstzeiten durch Maßnahmen des Personaleinsatzes beeinflusst werden. Umgekehrt kann aus ertragsgesetzlichen Gesichtspunkten beim Einsatz von mehr als einem Arbeiter je Maschine kein zusätzlicher kapazitiver Effekt mehr erzielt werden.

Dieser Wirkungszusammenhang läßt sich für eine bestimmte Maschinengruppe i und zwei Produkte j_1 und j_2 wie folgt darstellen:

$$r_{i,j_1,j_2}^* := \frac{r_{i,j_1,j_2} \cdot m_i^2}{p_i^2}, \quad \text{wobei } p_i^2 \leq m_i^2, \text{ sonst}$$

$$r_{i,j_1,j_2}^* := r_{i,j_1,j_2} \cdot$$

(vgl. hierzu auch das Beispiel in Abschnitt 3.2.1.4.2.)

3.2.1.4.2. Operationszeiten

Operationszeiten berechnen sich für eine bestimmte Maschinengruppe i und ein Produkt j wie folgt:

$$o_{ij}^* := \frac{o_{ij} \cdot l_j^p}{m_i^2}$$

Dabei bedeuten o_{ij} die Stückzeiten von Produkt j an einer Maschine der Maschinengruppe i und l_j^p die Losgröße von Produkt j .

Das folgende Beispiel dient zur Verdeutlichung der bisher entwickelten Zusammenhänge:

Ein Fertigungslos, das an einer Maschinengruppe zur Bearbeitung ansteht, erfordere gemäß den Fertigungsvorschriften eine Rüstzeit (r_{i,j_1,j_2}) in Höhe von 15 und eine Operationszeit ($o_{ij} \cdot l_j^p$) in Höhe von 60 Minuten. Die betreffende Maschinengruppe bestehe aus zwei Einzelaggregaten. Folgende Kombinationsmöglichkeiten des Maschinen- und Personaleinsatzes sind z.B. denkbar (vgl. Tab. 3):

Maschinen-einsatz m_i^2 (Stück)	Personal-einsatz p_i^2	Operations-zeiten o_{ij}^* (min)	Rüst-zeiten r_{i,j_1,j_2}^* (min)	Gesamt-Bearbeitungszeit (min)
1	1	$\frac{60}{1} = 60$	$\frac{15 \cdot 1}{1} = 15$	75
1	2	$\frac{60}{1} = 60$	15	75
2	1	$\frac{60}{2} = 30$	$\frac{15 \cdot 2}{1} = 30$	60
2	2	$\frac{60}{2} = 30$	$\frac{15 \cdot 2}{2} = 15$	45
2	3	$\frac{60}{2} = 30$	15	45

Tab. 3: Beispiel zur Bestimmung von Operations- und Rüstzeiten

Durch Zuschalten einer weiteren Maschine ($m_1^2 = 2$) kann also eine Verringerung der Gesamt-Bearbeitungszeit erreicht werden, während dies beim Einsatz zusätzlichen Personals nicht notwendigerweise der Fall ist. Nur wenn weniger Arbeiter als Maschinen zur Verfügung stehen, beschleunigt eine Vergrößerung des Personalbestandes die

Abfertigung des Auftrages. Die Rüstzeiten können im vorliegenden Beispiel nicht unter 15 Minuten sinken (vgl. Abschnitt 3.2.1.4.1.).

3.2.1.4.3. Fertigungszeiten

Fertigungszeiten f_j setzen sich folgendermaßen zusammen:

$$f_j := \sum_{i=1}^9 o_{ij} \quad \text{für alle } j = 1, \dots, 9.$$

In den Fertigungszeiten können Rüstzeiten nicht enthalten sein, da sie reihenfolgeabhängig und für ein und denselben Auftrag verschieden sind.

3.2.1.4.4. Übergangszeiten

Die Übergangszeiten berechnen sich aus dem in Abschnitt 3.2.2.1. beschriebenen Layout und den sich daraus ergebenden Entfernungen $d_{i_1 i_2}$ zwischen Maschinengruppen i_1 und i_2 . Dem Modell liegen Einheits-Übergangszeiten u zugrunde, die sich auf eine Transporteinheit je Entfernungseinheit beziehen.

Aus einer bestimmten Maschinengruppen-Anordnung ergibt sich eine Übergangszeiten-Matrix $(u_{i_1 i_2}^*)$, wobei i_1 den Ausgangspunkt, i_2 den Endpunkt eines beliebigen Loses darstellt:

$$(u_{i_1 i_2}^*) = u \cdot (d_{i_1 i_2}) \quad \text{mit } i_1, i_2 = 1, \dots, 9.$$

3.2.1.4.5. Endtermine

Endtermine E_a kann der Benutzer indirekt dadurch bestimmen, daß er eine Soll-Durchlaufzeit je Produkt vorgibt. Die Berechnung des Endtermins eines Auftrags erfolgt durch einfache Addition der Soll-Durchlaufzeit zur Ankunftszeit.

Alternativ besteht die Möglichkeit, Soll-Durchlaufzeiten s_j aus der Beziehung

$$s_j := f_j \cdot v \quad \text{mit } v \geq 1$$

berechnen zu lassen, v ist Aktionsvariable und ein Proportionalitätsfaktor zur Berechnung der Soll-Durchlaufzeiten aus den Fertigungszeiten.

3.2.1.5. Losgrößen

Die Fertigungsvorschriften enthalten einen Losgrößenvorschlag l_j^P , der vom Benutzer im Dialog verändert werden kann. Eine Losgrößenänderung beeinflusst direkt die Operationszeiten, die Produktwerte (vgl. Abschnitte 3.2.1.4.2. und 3.2.1.6.) und die mittlere Zwischenankunftszeit des Produktes j . Dabei wird der Faktor, um den die Losgröße verändert wurde, zur Korrektur der mittleren Zwischenankunftszeiten herangezogen. Je mehr die Losgröße eines bestimmten Produktes beispielsweise nach oben verändert wurde, desto später wird ein weiterer Auftrag dieser Klasse in der Werkstatt eintreffen. Umgekehrt muß ein Fertigteilslager, das in relativ kleinen Mengen nachbevorratet wird, in kürzeren Abständen aufgefüllt werden.

Dieser Wirkungszusammenhang ist deshalb sinnvoll, weil von einem konstanten Teilebedarf ausgegangen wird, der sich nicht durch autonome Entscheidungen im Werkstattbereich ändern läßt.

3.2.1.6. Produktwerte

Die Stammdaten enthalten Produktwerte je Stück p_j^P . Beim Produktwert je Los p_j^{P*} handelt es sich um den Wert eines Produktes nach Fertigstellung. Er wird zu Beginn des Dialogs neu bzw. nach Veränderung der Losgröße folgendermaßen berechnet:

$$p_j^{P*} := p_j^P \cdot l_j^P \quad \text{mit } j = 1, \dots, 9.$$

Auf eine Definition des Produktwertes im Sinne einer exakten Kapitalbindung, die eine laufende Neuberechnung des Kapitalbindungswertes entsprechend dem Fertigungsfortschritt eines Auftrags mit sich bringen würde, wird aus folgenden Gründen verzichtet:

- (1) Im Rahmen eines Modells, in das keine Daten aus der Praxis eingehen, sind Annahmen über den Fortschritt eines Produktes hinsichtlich seiner Kapitalbindung rein willkürlich und

dadurch evtl. auftretende Ergebnisverzerrungen für den Benutzer schlecht nachvollziehbar.

- (2) Entsprechende Maßnahmen können zwar dazu führen, daß auf Werkstattebene eine relativ geringe Kapitalbindung erreicht wird. Dies muß jedoch nicht zwangsläufig zu einem günstigeren Wert für den Gesamtbetrieb führen, da dieser ohnehin über Pufferlager verfügt, in welche die ggf. von der einzelnen Werkstatt schneller bearbeiteten wertvollen Zwischenprodukte eingelagert werden müssen.

Große Bedeutung erlangt die Kapitalbindung nur dann, wenn die Werkstatt einen Engpaß im Gesamtbetrieb darstellt. In diesem Fall reichen aber einfache Kapitalbindungswerte auf Werkstattebene nicht aus, da eine verzögerte Ablieferung hochwertiger Einzelteile weitere Kapitalbindungseffekte in anderen Betriebsteilen induziert.

Beim Ansatz einer Kapitalbindung müßte also strenggenommen der gesamten betrieblichen Situation Rechnung getragen werden, was im Rahmen des vorliegenden Modells zu weit führen würde.

3.2.1.7. Organisatorische Reihenfolgen

Eine Warteschlange w_{in} besteht aus Aufträgen a^j ⁴⁸⁾, wobei gilt:

$$\{w_{in}\} \subseteq \{a^j\} \quad \text{mit } i = 1, \dots, 9, \\ n = 1, \dots, n_i^w \\ \text{und } j \in \{1, \dots, 9\} \\ n_i^w \text{ bedeutet die aktuelle Länge von } w_{in}.$$

Nach Freiwerden einer Maschinengruppe i soll aus der Warteschlange w_{in} der Auftrag a^{j^*} mit der höchsten Priorität ausgewählt werden. Folgende Kriterien können bei der Auswahl von a^{j^*} berücksichtigt werden:

⁴⁸⁾ Strenggenommen muß a immer ein hochgestelltes j mit sich führen, was der Produktkategorie entspricht, der a angehört. Im folgenden soll bei der Verwendung von a als Index der Übersichtlichkeit wegen auf die Bezeichnung mit j verzichtet werden.

(1) Ankunftszeit in der Warteschlange:

insbesondere FCFS (First-Come-First-Served), d.h. der Auftrag, der zuerst an der Maschinengruppe ankommt, wird zuerst bearbeitet.

(2) Ankunftszeit in der Werkstatt:

Min A_a (FIS-, First-in-System-Regel) und ⁴⁹⁾
 Max A_a (LIS-, Last-in-System-Regel).

(3) Operationszeiten:

Min o_{ij}^* (KOZ-, Kürzeste-Operationszeit-Regel) und
 Max o_{ij}^* (LOZ-, Längste-Operationszeit-Regel).

(4) Fertigungszeiten:

Min f_j (KFZ-, Kürzeste-Fertigungszeit-Regel) und
 Max f_j (LFZ-, Längste-Fertigungszeit-Regel).

(5) Restfertigungszeiten:

Min g_a (KRFZ-, Kürzeste-Restfertigungszeit-Regel) und
 Max g_a (LRFZ-, Längste-Restfertigungszeit-Regel).
 Dabei errechnet sich g_a wie folgt:

$$g_a := \sum_{i=z}^g o_{ij}^* \quad \text{mit } i \in \{b_{ij}\},$$

wobei z = Nummer der bevorstehenden Station des Auftrags a^j
 mit der Produktnummer j .

(6) Umrüstzeiten:

Min r_{i,j_1,j_2}^* (KURZ-, Kürzeste-Umrüstzeit-Regel).

(7) Schlupfzeit:

Min h_a (KSZ-, Kleinste-Schlupfzeit-Regel).

⁴⁹⁾ Unter "Min" soll in diesem Zusammenhang die Suche nach der minimalen, unter "Max" die Suche nach der maximalen Ausprägung eines Kriteriums in der Warteschlange w_{in} verstanden werden.

Dabei wird h_a wie folgt berechnet:

- Summe der Operationszeiten bisheriger Arbeitsgänge:

$$t_1 := \sum_{i=1}^{z-1} o_{ij} \quad \text{mit } i \in \{b_{1j}\}$$

- Tatsächliche bisherige Bearbeitungszeit:

$$t_2 := I - A_a \quad \text{mit } I = \text{Istzeit}$$

- Verzögerungsfaktor (infolge Übergangs-, Umrüst-, Instandhaltungs- und sonstiger Wartezeiten):

$$t_3 := \frac{t_2}{t_1} = \frac{I - A_a}{\sum_{i=1}^{z-1} o_{ij}} \cdot$$

- Restfertigungszeit:

$$t_4 := g_a = \sum_{i=z}^g o_{ij}$$

- Prognose für Restfertigungszeit:

$$t_5 := t_4 \cdot t_3 = \sum_{i=z}^g o_{ij} \cdot \frac{I - A_a}{\sum_{i=1}^{z-1} o_{ij}}$$

- Restzeit bis zum Endtermin:

$$t_6 := E_a - I$$

- Schlupfzeit gesamt:

$$t_7 := t_6 - t_5 = E_a - I - \sum_{i=z}^g o_{ij} \cdot \frac{I - A_a}{\sum_{i=1}^{z-1} o_{ij}}$$

- Schlupfzeit je Arbeitsgang:

$$h_a := \frac{t_7}{t_8} = \frac{E_a - I - \sum_{i=2}^9 o_{ij} \cdot \frac{I - A_a}{\sum_{i=1}^9 o_{ij}}}{t_8},$$

wobei t_8 = Anzahl der restlichen Arbeitsgänge

Damit ist diese Prioritätsregel in der Lage, bei positivem Schlupf diejenigen Aufträge vorzuziehen, die noch relativ zahlreiche Arbeitsgänge zu absolvieren haben. Andererseits kann sie bei negativem Schlupf, d.h. potentieller Terminknappheit, auf eine andere Strategie umschalten: Sie zieht dann diejenigen Aufträge mit einer relativ geringen Zahl von Rest-Bearbeitungsgängen vor.

Beispiel:

Situation	1		2	
Aufträge	A 1	A 2	A 1	A 2
Schlupfzeit t_7	9	9	-9	-9
Arbeitsgänge t_8	1	9	1	9
Schlupfzeit h_a	9	1	-9	-1
Minimale Schlupfzeit	x		x	

Tab. 4: Schlupfzeitregel bei terminkritischen und -unkritischen Aufträgen

Folgendes Beispiel soll die Berechnung der Schlupfzeit verdeutlichen:

Bei insgesamt 16-stündigem Aufenthalt eines Auftrags in der Werkstatt betrage die Summe der Operationszeiten bisheriger Arbeitsgänge 2 Stunden. Die Erledigung der restlichen Arbeiten an dem Auftrag dauere noch 1 Stunde. Die Soll-Durchlaufzeit des Auftrags sei auf 25 Stunden festgesetzt, und schließlich seien noch 2 Arbeitsgänge zu absolvieren.

Mit den in der Formel verwendeten Bezeichnungen ergibt sich folgende Rechnung:

gegeben

Ankunftszeit	A_a	0. Stunde
Istzeit	I	16. Stunde
Endtermin	E_a	25. Stunde
Summe der Operationszeiten bisher	t_1	2 Stunden
Restfertigungszeit	t_4	1 Stunde
Anzahl der restlichen Arbeitsgänge	t_8	2

zu berechnen

Tatsächliche Bearbeitungszeit	t_2	16 Stunden
Verzögerungsfaktor	t_3	8
Prognose für Restfertigungszeit	t_5	8 Stunden
Restzeit bis zum Endtermin	t_6	9 Stunden
Schlupfzeit gesamt	t_7	1 Stunde
Schlupfzeit je Arbeitsgang	h_a	1/2 Stunde

Diese Regel unterscheidet sich von herkömmlichen Schlupfzeitregeln durch den Verzögerungsfaktor t_3 zur Prognose der Restbearbeitungszeit eines Auftrags. Er ist insbesondere deshalb wesentlich, weil in der Restfertigungszeit gemäß obiger Definition Rüstzeiten nicht enthalten sind, da das Modell auf deren Reihenfolgeabhängigkeit abgestellt ist und sich die Rüstzeiten deshalb nicht voraussehen lassen. Neben den Umrüstzeiten führen Übergangs-, Instandhaltungs- und ablaufbedingte Wartezeiten zu Verzögerungen innerhalb der Fertigung. Solche Zeiten werden in ihrer Relation zur reinen Fertigungszeit mit Hilfe des Faktors t_3 pauschal berücksichtigt. So erhalten z.B. Aufträge, die im Laufe der Bearbeitung bereits hohe Wartezeiten hinter sich haben, einen relativ hohen Verzögerungsfaktor, wodurch sich die Schlupfzeit verringert. Dadurch werden sie solange mit hoher Priorität durch die Fertigung geschleust, bis ihre durchschnittliche Wartezeit unter die der übrigen Aufträge sinkt und diese anschließend vorrangig behandelt werden.

Eine Erweiterung des obigen Zahlenbeispiels zeigt die Bedeutung der Schlupfzeitregel für den Bearbeitungsverlauf eines Auftrags:

Angenommen, der Auftrag erhalte erst bei negativer Schlupfzeit eine relativ hohe Prioritätsziffer. Wegen $h_a = 1/2$ Stunde (zur Zeit $I = 16$. Stunde) wird er vorläufig nicht bearbeitet. Erst nach einer Stunde wird die Maschine wieder frei ($I = 17$. Stunde), und es ist ein neuer Auftrag auszuwählen. Zu diesem Zeitpunkt ist die Schlupfzeit auf $-1/4$ Stunde gesunken, was eine Anhebung der Prioritätsziffer zur Folge hat. In einer halben Stunde werde der vorletzte Arbeitsgang des Auftrags durchgeführt. Er gelangt somit nach $17 \frac{1}{2}$ Stunden in die Warteschlange seiner letzten Station, wenn man von Übergangszeiten absieht. Diese Maschine wird erst nach $2 \frac{1}{2}$ Stunden frei, und die Schlupfzeit beträgt zur $I = 20$. Stunde

$$h_a = \frac{25 - 20 - 0,5 \cdot \frac{20}{2,5}}{1} \text{ Stunden} \\ = 1 \text{ Stunde.}$$

Daraus läßt sich ableiten, daß der Auftrag vorläufig nicht beendet wird, solange nicht das Schlupfzeitniveau unter das der anderen Aufträge abgesunken ist.

Ein besonderes Problem ergibt sich bei neu eingetroffenen Aufträgen, die naturgemäß noch keine Bearbeitungszeiten aufweisen und bei denen wegen $t_1 = 0$ keine Berechnung der Verzögerungsfaktoren und damit der Schlupfzeiten möglich ist. Für die Behandlung solcher Aufträge wird als Systemparameter ein konstanter Verzögerungsfaktor eingeführt. Setzt man den Parameter relativ hoch, haben neue Aufträge tendenziell eher eine Chance, bearbeitet zu werden, als wenn man ihn niedrig wählt. Andererseits kann dadurch die Fertigstellung bereits fortgeschrittener Aufträge blockiert werden.

(8) Produktwerte:

$\text{Max } p_j^{P*}$ (KAP-, Kapitalbindungs-Regel).

(9) Warteschlangenlänge an der Folgemaschine:

$\min w_{i'n}$ (KMR-, Kritische-Maschinen-Regel).

Dabei bedeutet i' die entsprechend der Bearbeitungsreihenfolge ($b_{i,j}$) des Auftrags a^j auf die Maschinengruppe i folgende Maschinengruppe und berechnet sich nach:

$$i' := b_{i+1,j} \quad \text{für } b_{i+1,j} > 0.$$

Ist die Maschinengruppe i die letzte Station $b_{m_j^p,j}$ eines Auftrags a^j , nimmt $b_{m_j^p+1,j}$ den Wert Null an.

Es gilt (vgl. Abschnitt 3.2.1.3.):

$$w_{i'n} := 0 \quad \text{für } b_{i+1,j} = 0.$$

Damit erhalten innerhalb der KMR-Regel solche Aufträge, deren Bearbeitungsende unmittelbar bevorsteht, dieselbe Priorität wie andere, deren Folgemaschine leersteht.

(10) Externe Prioritäten:

Auswahl entsprechend einer vom Benutzer eingegebenen produktgebundenen Priorität (EP-Regel).

Alle in Punkt (2) bis (10) genannten Prioritätskriterien können im Rahmen einer kombinierten dynamischen Prioritätsregel (KOMBI-Regel) zur Anwendung kommen. Dabei wird jedem Element a^j einer Warteschlange (w_{in}) je Kriterium k eine Rangziffer c_{ka} zugeteilt. Anschließend werden die Rangziffern mit den Kriteriengewichten e_k multipliziert und die daraus gewonnenen Werte über alle Kriterien addiert. Die Priorität p_a^r eines Auftrags a^j innerhalb der Warteschlange errechnet sich wie folgt:

$$p_a^r := \sum_{k=1}^g c_{ka} \cdot e_k \quad \text{mit } c_{ka} \in \{1, \dots, n_1^w\}.$$

Ausgewählt wird der Auftrag a^j mit dem maximalen Wert p_a^{r*} :

$$p_a^{r*} := \max_{a^j \in w_{in}} p_a^r.$$

Bei der Berechnung erhält das Kriterium k mit der kleinsten Ausprägung die höchste Rangziffer c_{ka} . Im Falle positiver Kriteriengewichtung wird somit Aufträgen mit den kleinsten Kriterienausprägungen die höchste Priorität zugewiesen und umgekehrt.

Werden negative Kriteriengewichte vergeben, ergibt sich dadurch die Möglichkeit, Aufträge mit hohen Kriterienwerten zu bevorzugen. Damit können vom Benutzer eigene Prioritätsregeln über die Eingabe von positiven bzw. negativen Kriteriengewichten aufgebaut werden. Beispielsweise kann durch positives Vorzeichen für die Operationszeiten eine KOZ-, durch negatives eine LOZ-Regel konstruiert werden.

Ein Zahlenbeispiel soll das beschriebene Prinzip veranschaulichen (vgl. Tab. 5). Darin sind alle Kriterien k mit Gewichten e_k versehen. Die Warteschlange (w_{in}) besteht aus 4 Aufträgen. Der Auswahlprozeß verläuft folgendermaßen:

- (1) Berechnung der Kriterienausprägungen
(vgl. Punkt (2) bis (10) dieses Abschnitts)
- (2) Aufbau einer Rangfolge (c_{ka}) der Aufträge je Kriterium
- (3) Gewichtung der Rangziffern c_{ka} mit den jeweiligen Kriteriengewichten e_k
- (4) Für jeden Auftrag Addition der gewichteten Rangziffern über alle Kriterien
- (5) Auswahl des Maximums aus der Summe der gewichteten Rangziffern und damit Wahl des Auftrags mit der höchsten Priorität.

Aus der Kriteriengewichtung im Beispiel ergibt sich folgendes Bild:

Als wichtigste Prioritätsregeln sollen

- KSZ-Regel und
- KAP-Regel

in die Berechnung eingehen, wobei im ersten Fall die kleinsten Schlupfzeiten, im zweiten Fall die höchsten Produktwerte den Vorrang haben.

Kriterion (k)	1) (r_k)	Kriterienprioritäten				Rangziffern (r_{kR})				Gewichtete Rangziffern ($r_{kR} \cdot r_k$)			
		Auf- trag1	Auf- trag2	Auf- trag3	Auf- trag4	Auf- trag1	Auf- trag2	Auf- trag3	Auf- trag4	Auf- trag1	Auf- trag2	Auf- trag3	Auf- trag4
1. Ankunftszeit in der Werkstatt (r_{k1})	0	25	70	33	110	4	2	3	1	0	0	0	0
2. Bearbeitungszeiten (r_{k2})	3	52	170	310	74	4	2	1	3	12	6	3	9
3. Fertigungszeiten (r_{k3})	2	88	92	516	412	2	1	3	4	4	2	6	8
4. Postfertigungszeiten (r_{k4})	-1	425	219	0	412	1	3	4	2	-1	-3	-4	-2
5. Umrüstzeiten (r_{k5})	1	210	320	90	0	1	2	3	4	1	2	3	4
6. Schlupfzeiten (r_{k6})	4	-10	40	-30	10	3	1	4	2	12	4	16	8
7. Produktwerte (r_{k7})	-4	800	500	600	800	1	4	3	2	-4	-16	-12	-8
8. Warteschlangenlängen an der Folienmaschine (r_{k8})	1	0	42	13	10	4	1	2	3	4	1	2	3
9. Externe Prioritäten (r_{k9})	-1	4	2	1	3	1	3	4	2	-1	-3	-4	-2
						Summe gewichteter Rangziffern (r_k^*)				27 (21)	-7 (-4)	10 (7)	20 (26)
						Auszuwählender Auftrag (r_k^*)				✓			(✓)

1) Kriterienprioritäten

2) die Ziffer 1 entspricht dem höchsten, die Ziffer 4 dem niedrigsten Wert der jeweiligen Kriterienprioritäten

Tab.5: Zahlenbeispiel zur Funktionsweise der kombinierten dynamischen Prioritätsregel

Am wenigsten sollen

- LRFZ-Regel
- KURZ-Regel
- KMR-Regel und
- EP-Regel

berücksichtigt werden. Das Kriterium "Ankunftszeit in der Werkstatt" geht überhaupt nicht in die Berechnung ein.

Die dargestellte Warteschlangensituation führt in Verbindung mit den gewählten Gewichtungsfaktoren zur Auswahl von Auftrag 1. Vertauscht man z.B. die Gewichte der Kriterien "Umrüst-" und "Schlupfzeiten", so führt dies zu einer Auswahl von Auftrag 4.

Eine mögliche Erklärung liegt darin, daß die Differenz zwischen den Umrüstzeiten des Auftrags 1 und denen des Auftrags 4 relativ groß ist und somit auch die diesbezüglichen Rangziffern weit auseinanderliegen (1 und 4). Deshalb führt eine hohe Gewichtung dieses Kriteriums zu einer stärkeren Bewertung von Auftrag 4.

Betrachtet man die Situation genauer, so sind noch weitere Gesichtspunkte in die Überlegung einzubeziehen:

Beim Vergleich der gewichteten Rangziffern schneidet Auftrag 1 beim Umrüstzeitkriterium nur um 3 Punkte besser, beim Schlupfzeitkriterium aber um 9 Punkte schlechter ab als zuvor. Auftrag 4 erhält eine starke Verbesserung der Priorität beim Umrüstzeitkriterium (um 12 Punkte) und eine geringfügige Verschlechterung beim Schlupfzeitkriterium (um 6 Punkte). Vergleicht man die Veränderung der gewichteten Rangziffern der beiden Aufträge, so verbessert sich Auftrag 4 gegenüber Auftrag 1 beim Umrüstzeitkriterium mehr (um $12 - 3 = 9$ Punkte) als er sich gegenüber seinem "Konkurrenten" beim Schlupfzeitkriterium verschlechtert (um $6 - 9 = -3$ Punkte).

3.2.2. Betriebsmittelbezogene Eigenschaften

3.2.2.1. Layoutplanung

Wie in Abschnitt 3.2.1.4.4. dargelegt, werden durch die räumliche Anordnung von Maschinengruppen innerhalb der Werkstatt die Entfernungen $d_{i_1 i_2}$ und damit die Übergangszeiten $u_{i_1 i_2}$ der Aufträge zwischen den Stationen festgelegt.

Als Entfernungseinheit sei die direkte Verbindung zwischen zwei unmittelbar benachbarten Maschinengruppen zu verstehen. Der Stellplatz einer Maschinengruppe i_1 sei definiert durch die Koordinaten (x_1, y_1) und derjenige einer Maschinengruppe i_2 durch (x_2, y_2) . Somit ergibt sich die Entfernung $d_{i_1 i_2}$ zwischen i_1 und i_2 folgendermaßen:

$$d_{i_1 i_2} := |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad \text{für } i_1 \neq i_2,$$

$$d_{i_1 i_2} := 0 \quad \text{für } i_1 = i_2 \text{ und}$$

$$d_{i_1 i_2} := d_{i_2 i_1} \quad \text{für alle } i_1, i_2 = 1, \dots, 9.$$

Transporte auf der Diagonalen sind somit nicht erlaubt.

In einem Beispiel werden innerhalb eines 6×6 - Rasters 9 Maschinengruppen so angeordnet:

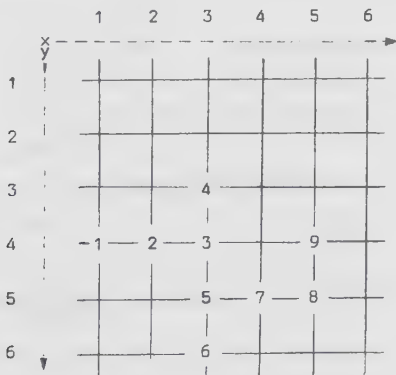


Abb. 2: Beispiel einer Anordnung von Maschinengruppen innerhalb eines 6×6 - Rasters

Die Darstellung der Abstände zwischen je 2 Maschinengruppen i_1 und i_2 ergibt (wegen $d_{i_1 i_2} = d_{i_2 i_1}$) eine symmetrische Matrix.

$i_2 \backslash i_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2	1								
3	2	1							
4	3	2	1						
5	3	2	1	2					
6	4	3	2	3	1				
7	4	3	2	3	1	2			
8	5	4	3	4	2	3	1		
9	4	3	2	3	3	4	2	1	

Tab. 6: Entfernungsmatrix zwischen je 2 Maschinengruppen i_1 und i_2

3.2.2.2. Kapazität von Maschinengruppen ⁵⁰⁾

Die Anzahl installierter Maschinen ist für alle Maschinengruppen festgelegt durch

$$\underline{m}^1 := (m_i^1) \quad \text{mit } i = 1, \dots, 9,$$

die Anzahl eingesetzter Maschinen durch

$$\underline{m}^2 := (m_i^2) \quad \text{mit } i = 1, \dots, 9.$$

Dabei gilt : $m_i^1 \geq m_i^2$ für alle $i = 1, \dots, 9$.

⁵⁰⁾ vgl. Wirkungszusammenhänge in den Abschnitten 3.2.1.4.1. und 3.2.1.4.2.

3.2.2.3. Personalkapazität 51)

Der gesamte Personalbestand in der Werkstatt sei p^1 . Das jeweils an den einzelnen Maschinengruppen eingesetzte Personal ist festgelegt durch

$$p^2 := (p_i^2) \quad \text{mit } i = 1, \dots, 9.$$

Dabei gilt:

$$p^1 \geq \sum_{i=1}^9 p_i^2.$$

3.2.2.4. Kapazität von Zwischenlagern 52)

Die maximal zulässige Länge einer Warteschlange je Maschinen-
gruppe ist definiert als l_i^w .

Dabei gilt:

$$l_i^w \geq n_i^w.$$

Die aktuelle Länge einer Warteschlange n_i^w darf also die maximal zulässige Länge nicht überschreiten. Die Warteschlangen bestehen aus Fertigungslosen, die jeweils auf einer Palette gelagert sind und somit alle denselben Zwischenlagerbedarf aufweisen.

3.2.2.5. Instandhaltung von Maschinengruppen

Dem Instandhaltungsmodell liegt die Zielsetzung zugrunde, im Rahmen eines einfachen Bausteins verschiedene laufzeitabhängige Reparaturstrategien zu testen.

Jede der 9 Maschinengruppen besteht aus 4 Reparatureinheiten, deren Ausfallverhalten zufällig und voneinander unabhängig ist. Mittlere Laufzeiten gehen als Systemparameter in das Modell ein (vgl. auch Abschnitt 4.2.1.).

Laufzeiten werden vereinfachend entsprechend einer Gleichverteilung erzeugt und gelten entweder ab der letzten planmäßigen Instandhaltung je Maschinengruppe für alle 4 Reparaturteilarten oder

51) vgl. Wirkungszusammenhänge in Abschnitt 3.2.1.4.1.

52) vgl. Abschnitt 3.2.1.7. (Warteschlangendefinition).

ab dem letzten Zufallsausfall für die dort ersetzte Reparatur-einheit allein. Aktionsvariable sind die Instandhaltungsintervalle je Maschinengruppe.

Für jede planmäßig durchgeführte Instandhaltungsaktion werden zuvor generierte Zufallsausfalltermine gelöscht und für alle 4 Reparatureinheiten neue, meist später liegende Ausfalltermine generiert.

Die Dauer von planmäßigen Instandhaltungsaktionen einerseits und von Zufallsreparaturen andererseits sind Systemparameter und für alle Reparaturteilarten konstant.

Abb. 3 zeigt beispielhaft für eine Maschine, welche Reaktion das Modell auf die Änderung des Instandhaltungsintervalles zeigen kann. In Teil (1) wird nur alle 40, in Teil (2) alle 20 und in Teil (3) alle 10 Zeiteinheiten eine planmäßige Wartung durchgeführt. Bei Verkürzung der Instandhaltungsintervalle läßt sich die Anzahl der durch Zufall bedingten Ausfälle insgesamt senken, jedoch steigt der Zeitaufwand für die planmäßige Wartung. Unter der Annahme, im Beispiel dauere eine Zufallsreparatur im Durchschnitt 2 und eine planmäßige Wartungsmaßnahme 4 Zeiteinheiten, ergibt sich folgende Übersicht:

	(1)	(2)	(3)
Anzahl der Wartungen	1	2	4
Anzahl der Zufallsausfälle	12	9	6
Zeitbedarf für Wartungen	4	8	16
Zeitbedarf für Zufallsausfälle	24	18	12
Summe der Instandhaltungszeiten	28	26	28

Tab. 7: Beispiel zur Ermittlung der Instandhaltungszeiten

Es läßt sich auch leicht nachvollziehen, daß durch Variation der Systemparameter (z.B. des Zeitbedarfs für planmäßige Wartungen und für Zufallsausfälle) völlig unterschiedliche Situationen für den Instandhaltungsplaner entstehen können, denen er mit entsprechenden Strategien (z.B. Feuerwehrstrategie) zu begegnen hat.

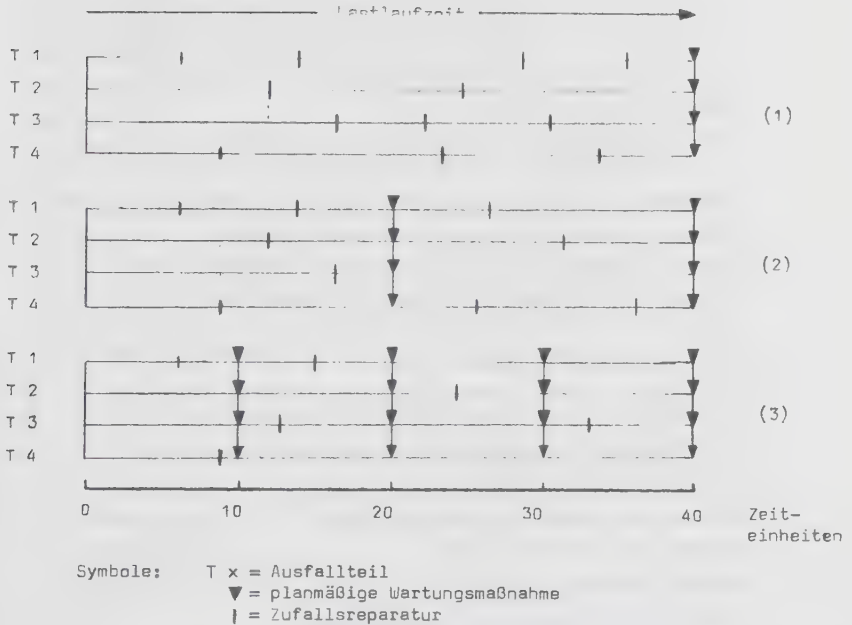


Abb. 3: Beispiel für die Wirkung der Länge der Instandhaltungsintervalle auf das Ausfallverhalten einer Maschine

Gemäß der Grundkonzeption des Modells können auch im Rahmen der Instandhaltungsplanung nur Maschinengruppen in ihrer Gesamtheit behandelt werden. Die Tatsache, daß z.B. alle Maschinen einer Maschinengruppe gleichzeitig Zufallsausfällen unterworfen bzw. an ihnen Wartungsmaßnahmen durchgeführt werden, mag auf den ersten Blick etwas praxisfremd erscheinen, wirkt sich aber aus folgenden Gründen nicht verfälschend auf das Modellverhalten aus:

- (1) Werden mehrere Maschinen je Gruppe eingesetzt, steigt die Wahrscheinlichkeit eines Zufallsausfalls innerhalb der gesamten Gruppe, da sich ja die Ausfälle überlagern.

Andererseits fallen ggf. nur bestimmte Einzelaggregate aus, so daß mit der Restkapazität weitergearbeitet werden kann. Auf lange Sicht wäre die Auswirkung dieses Modellverhaltens auf die Kapazitätsauslastung gleich wie unter den obigen vergrößernden Annahmen.

- (2) Dementsprechend müßten auch mehr Wartungsmaßnahmen an der gesamten Gruppe durchgeführt werden. Jedoch betreffen solche Maßnahmen ebenfalls nur Einzelaggregate, und die Restkapazität bliebe erhalten. Außerdem ist es unter Umständen auch betriebswirtschaftlich sinnvoll, gleiche Maschinen innerhalb einer Gruppe in einem Arbeitsgang zu warten.

3.2.3. Simulationstechnik

Im Mittelpunkt des Simulators steht die Ereignisliste. Darin sind alle Ereignisse gespeichert, deren Termin genau vorausbestimmt ist. Dazu gehören:

- | | |
|--|------------------|
| - Ankunft eines Auftrags in der Werkstatt: | Ereignisart = 0 |
| - Abschluß eines Arbeitsganges: | Ereignisart > 0 |
| - Ankunft an einer Maschinengruppe | Ereignisart < 0. |

Die Ereignisliste erfüllt folgende Funktionen:

- (1) sequentielle Verarbeitung der Datei entsprechend dem Zeitablauf der Simulation (nach der Methode der variablen Zeitinkremente) und
- (2) Einspeichern zukünftiger Ereignisse in ihrer zeitlichen Reihenfolge.

Dabei handelt es sich um Operationen, die während des Simulationsablaufes zeitlich überlappt ausgeführt werden.

In Tab. 8 ist ein einfaches Beispiel zum Aufbau von Ereignislisten gezeigt. (Zur exakten Bedeutung der Ereignisart vgl. Abschnitt 4.3.) Angenommen, die Simulationsuhr zeige auf 8.05 h. Dann wurden seit 7.39 h 5 Ereignisse in der Simulation verarbeitet. Der Zeitzeger geht zum Ereignis 6: Auftrag 28 trifft neu in der Werkstatt ein und soll zu seiner 1. Station gebracht werden.

Ereignis-Nr.						I				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ereignisart	1	-1	-1	1	1	0	1	-1	1	1
Ereigniszeit	7.39	7.50	7.51	8.04	8.04	8.05	8.09	8.10	8.15	8.18
Stations-Nr.	4	3	5	9	2	1	6	2	3	4
Auftrags-Nr.	25	37	80	29	70	28	81	19	2	65

Tab. 8: Beispiel einer Ereignisliste vor Einplanung eines Auftrags

Um 8.17 h sei die Arbeit an dieser Station beendet. Da die Ereignisliste nach dem Zeitablauf sortiert ist, muß der Endtermin an der 1. Station hinter das Ereignis 9 eingespeichert werden. Der Zeitzeiger wird um eine Stelle weitergerückt usw.

Die Ereignisliste zeigt nun folgenden Aufbau:

Ereignis-Nr.						I					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ereignisart						0	1	-1	1	1	1
Ereigniszeit						8.05	8.09	8.10	8.15	8.17	8.18
Stations-Nr.	wie Tab. 8					1	6	2	3	2	4
Auftrags-Nr.						28	81	19	2	28	65

Tab. 9: Beispiel einer Ereignisliste nach Einplanung eines Auftrags

Daneben enthält der Simulator Warteschlangenvektoren unterschiedlicher Länge, in denen zeitlich nicht vorherbestimmte potentielle Ereignisse enthalten sind.

Das obige Beispiel berücksichtigte nämlich nicht die Tatsache, daß die 1. Station des Auftrags 28 durch einen anderen Auftrag belegt sein könnte. Deshalb muß im Simulator zusätzlich eine Möglichkeit bestehen, diesen Auftrag solange in einen Puffer einzulagern, bis er auf der Maschine bearbeitet werden kann. Die Ereignisliste bleibt solange unverändert, bis ein Arbeitsbeginn auf der 1. Station möglich ist.

So können gemäß Modellkonzeption in der Ereignisliste ab Istzeit mehrere Ankünfte von Aufträgen - die genaue Zahl hängt vom Ankunfts-

prozeß und damit von den Systemparametern ab (vgl. Abschnitt 3.2.1.1. und 4.2.1.) - , maximal 9 Abschlußtermine von Arbeitsgängen und maximal 9 Anfangstermine an Maschinengruppen gespeichert sein. Zusätzlich können Warteschlangen bis zu ihrer maximal zulässigen Länge weitere Aufträge annehmen. Die Kapazität des Gesamtsystems ist somit auf

$$\sum_{i=1}^9 l_i^w + 18$$

Aufträge begrenzt. Innerhalb dieser Restriktion können Aufträge entsprechend ihrer Bearbeitungsreihenfolge b_{ij} beliebig zwischen Aktivitäts- (nächstes Ereignis des Auftrags ist in der Ereignisliste festgehalten) und Wartestatus hin und her bewegt werden. Wichtige Zeit-, Kosten- und Leistungsgrößen werden während des Simulationsablaufes mitgeführt.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Simulationskerns ist der Zufallszahlengenerator. Er dient dazu, Pseudozufallszahlen für

- Produktnummern eintreffender Aufträge,
- Zwischenankunftszeiten und
- Laufzeiten

zu erzeugen. Er ist nach der multiplikativen Kongruenzmethode von der Form

$$x_{i+1}^z = a^z \cdot x_i^z \pmod{m^z}$$

aufgebaut. Dabei bedeuten:

x_{i+1}^z	: neue Zufallszahl
a^z	: konstanter Multiplikator
x_i^z	: Startwert x_0^z bzw. zuletzt erzeugte Zufallszahl
m^z	: Konstante

3.2.4. Kostenbestandteile

In den Fertigungs-, Betriebsmittel- und Personalstammdaten sind folgende Kostenbestandteile gespeichert:

(1) Materialkosten.

Sie unterteilen sich in Materialgemein- und Materialeinzelkosten. Von den Gemeinkosten sei angenommen, daß sie sich proportional zu der Lastlaufzeit⁵³⁾ und der Anzahl eingesetzter Maschinen verhalten. Materialeinzelkosten beziehen sich auf ein Stück eines Loses für jeweils ein Produkt und werden im Augenblick des Eintreffens eines Auftrags in der Werkstatt wirksam.

(2) Maschinenkosten.

Sie teilen sich auf in fixe und variable Kosten. Fixkostensätze sind bestimmt für eine Maschine je Maschinengruppe pro Zeiteinheit. Fixkosten verhalten sich proportional zur Anzahl installierter Maschinen je Maschinengruppe und zum Zeitablauf (jedoch unabhängig vom Beschäftigungsgrad). Variable Kostensätze beziehen sich auf je eine Einheit der Lastlaufzeit einer eingesetzten Maschine je Maschinengruppe, sind infolgedessen proportional zum Beschäftigungsgrad und Maschineneinsatz.

(3) Instandhaltungskosten.

Im wesentlichen treten fixe Kostenbestandteile durch die Unterhaltung einer Instandhaltungsmannschaft auf.

Da diese aber dem Gesamtbetrieb zur Verfügung steht und kurzfristig zwischen den einzelnen Betriebsteilen (Werkstätten) austauschbar ist, lassen sich die Fixkosten in Abhängigkeit von der Einsatzzeit des Instandhaltungspersonals proportionalisieren.

⁵³⁾ Unter Lastlaufzeit ist die Summe aller Zeiten zu verstehen, in denen Bearbeitungsvorgänge direkt am Werkstück vorgenommen werden.

(4) Zwischenlagerkosten.

Sie sind beschäftigungsfix und verhalten sich proportional zur Anzahl reservierter Plätze (maximal zulässige Länge der Warteschlangen) und zum Zeitablauf.

(5) Personalkosten.

Sie sind beschäftigungsfix und verhalten sich proportional zur Gesamtzahl des Personals und zum Zeitablauf.

(6) Kapitalbindungskosten.

Diese ergeben sich aus einem über die Simulationszeit hinweg berechneten Durchschnittswert für die Kapitalbindung und einem vorgegebenen Zinssatz.

Damit stellen sich die Gesamtkosten C^T im Planungszeitraum T wie folgt dar:

$$C^T = \sum_{i=1}^g \frac{\alpha_i^m Q_i^2}{g} + \sum_j \beta_j l_j^p + \sum_{i=1}^g \gamma_i m_i^1 T + \sum_{i=1}^g \delta_i m_i^2 Q_i +$$

(1) (1) (2) (2)

$$+ \varepsilon Z + \sum_{i=1}^g \eta_i l_i^w T + \mu p^1 T + \nu K T \quad 54)$$

(3) (4) (5) (6)

Dabei bedeuten:

- α : Materialgemeinkosten je Einheit der Lastlaufzeit bei Einsatz von je einer Maschine je Maschinengruppe
- Q_i : Lastlaufzeiten je Maschinengruppe i
- β_j : Materialeinzelkosten für ein Stück eines Loses von Produkt j
- γ_i : Fixkosten je Maschine einer Maschinengruppe i je Zeiteinheit

54) Im Ausdruck $\sum_j \beta_j l_j^p$ läuft der Summenzähler j über die Ausprägungen aller Aufträge, die sich in der Werkstatt befinden: $j \in \{1, \dots, 9\}$ über alle a .

- c_i : Variable Kosten je eingesetzter Maschine einer Maschinen-
gruppe i je Einheit der Lastlaufzeit
- c : Variable Kosten je Zeiteinheit einer planmäßigen Instand-
haltungsaktion bzw. Zufallsreparatur
- Z : Summe aller Instandhaltungszeiten
- r_i : Lagerkosten pro reserviertem Zwischenlagerplatz je
Zeiteinheit
- p : Personalkosten je Arbeitskraft je Zeiteinheit
- v : Zinssatz für gebundenes Kapital je Zeiteinheit
- K : Mittlere Kapitalbindung in der Werkstatt

Obige Darstellung berücksichtigt keine Produktionsunterbrechungen, die sich durch den üblichen Arbeitszeitrhythmus ergeben und deren Festlegung durch den Benutzer im vorliegenden System möglich ist (vgl. Abschnitt 4.2.4., Punkt (8)). Gegenüber der oben etwas vereinfachten Beziehung ist im Modell nämlich vorgesehen, nach einer Arbeitsunterbrechung und anschließenden Fortsetzung der Simulation die Bestandteile "fixe Maschinenkosten", "Zwischenlager-" und "Kapitalbindungskosten" um den im Unterbrechungsintervall angefallenen Kostenanteil hochzurechnen.

3.2.5. Zielsystem

In der Praxis werden Ziele wie "maximale Kapazitätsauslastung", "höchste Termintreue" oder "Kostenminimierung" über bestimmte Zeiträume hinweg meist ausschließlich verfolgt, obwohl sich deren Erfüllung im Hinblick auf ein Gesamtoptimum nicht unbedingt günstig auswirken muß. Als objektiver Maßstab für die Leistungsmessung einer Werkstatt bietet sich der Bereichserfolg an, da er sämtliche Leistungs- und Kostenkomponenten der Produktion enthält (vgl. Abb. 4).

Kostensenkungsmaßnahmen in Form einer Verringerung der Kapazität sind z.B. nur solange günstig für den Bereichserfolg, wie sich nicht die Durchlaufzeiten der Aufträge verzögern und dadurch die Einhaltung von Fertigstellungsterminen gefährdet wird. Einseitige Maßnahmen zur Maximierung der Kapazitätsauslastung (z.B. Erhöhung

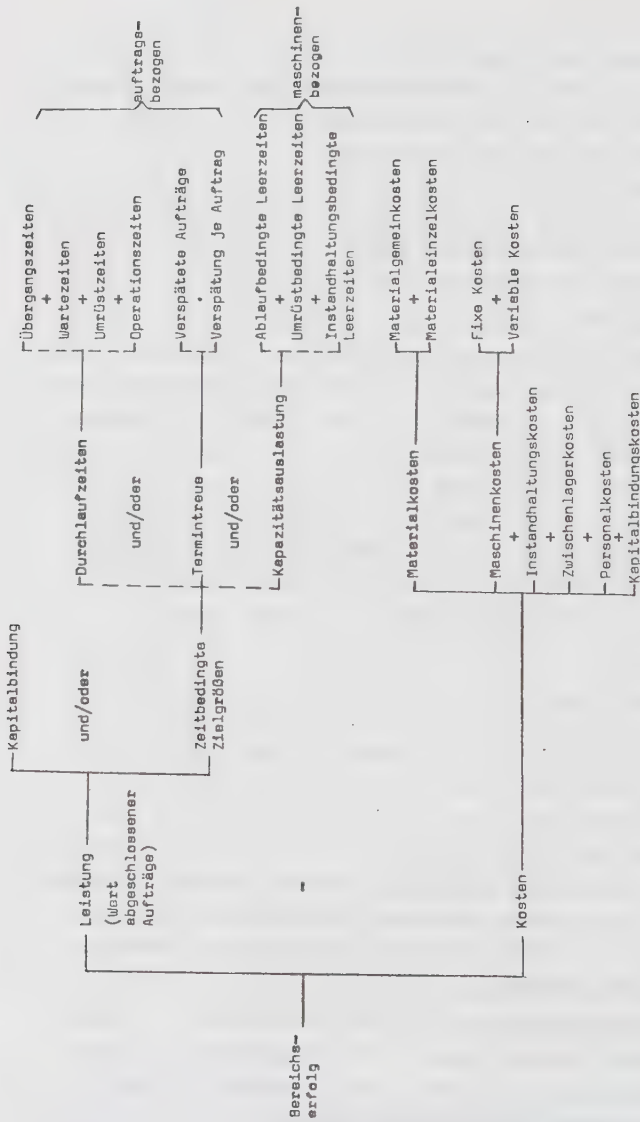


Abb. 4: Zielsystem bei der Werkstattfertigung

der Losgrößen) können ebenfalls eine Durchlaufzeitverzögerung der Aufträge zur Folge haben und so zu einer Verringerung des Bereichserfolgs führen. Ein hierarchisch gegliedertes Ziel-system (vgl. Abb. 4) soll diese Zusammenhänge verdeutlichen.

Betrachtet man die Steigerung des Bereichserfolges als Hauptziel, kann sie entweder durch Erhöhung der Leistungs- oder durch Senkung der Kostenkomponenten erreicht werden. Dabei besteht die Leistung einer Werkstatt im Wert der abgeschlossenen Aufträge. Somit ergibt sich in diesem Zweig die Möglichkeit, die Kapitalbindung in der Fertigung dadurch zu verringern, daß wertintensive Produkte forciert werden. Weitere Zielgrößen betreffen den mengenmäßigen Ausstoß pro Zeiteinheit. Darunter werden zeitbedingte Kriterien wie geringste Durchlaufzeiten, höchste Termintreue und maximale Kapazitätsauslastung mit ihren einzelnen Unterzielen verstanden, die alternativ oder kombiniert verfolgt werden können.

Es ist jedoch zu beachten, daß Maßnahmen zur Auftragsbeschleunigung zu Kostenerhöhungen führen können, was den Effekt der Steigerung des Bereichserfolges teilweise oder ganz zunichte machen kann (vgl. einführende Beispiele). Deshalb handelt es sich beim Problem der Maximierung des Bereichserfolges darum, im Rahmen festgelegter Werkstattbedingungen Leistungs- und Kostenkomponenten in eine optimale Beziehung zueinander zu bringen.

3.3. Wichtige Prämissen des Modells

Um eine einfache Handhabung des Modells im Rahmen eines Entscheidungstrainings zu gewährleisten, sind folgende Prämissen gesetzt worden:

- (1) Das Modell ist auf Einzelteilefertigung ausgelegt. Montagevorgänge sind nicht möglich.
- (2) Das gesamte Auftragspektrum ist in neun Auftragsklassen (Produkte) aufgeteilt, die durch gleiche Fertigungsvorschriften gekennzeichnet sind. Eine Einzelverfolgung von Aufträgen findet nur simulatorintern statt und kann

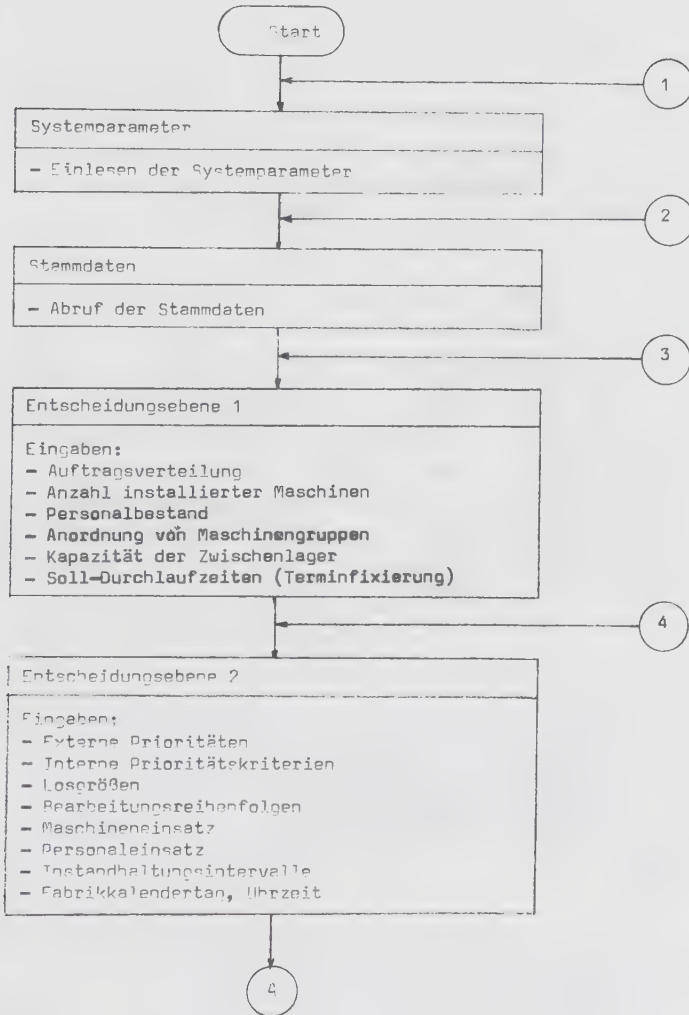
vom Benutzer nicht unmittelbar beeinflußt werden (z.B. ist es nur möglich, Auftragsklassen, nicht aber einzelne Aufträge mit internen Prioritäten zu versehen).

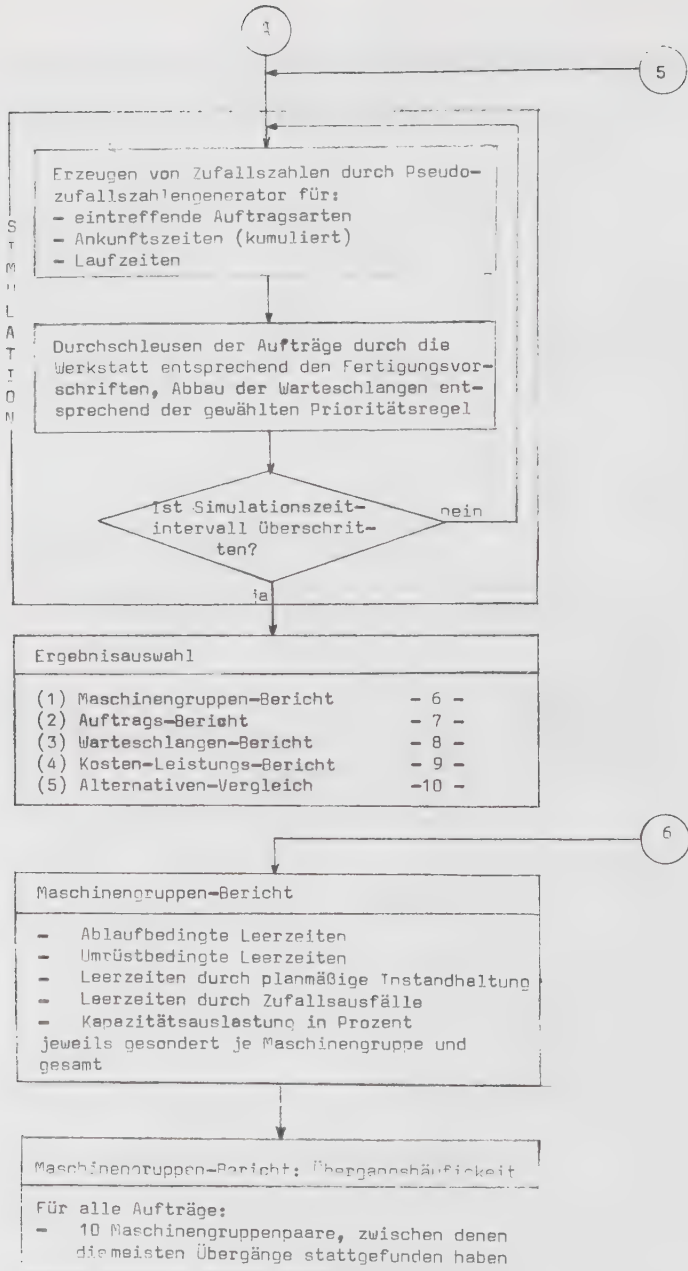
- (3) Eine Maschinengruppe wird als Einheit behandelt. Die Anzahl der zum Einsatz kommenden Maschinen je Gruppe ist gleichbedeutend mit dem Splittungsfaktor, dem die zu bearbeitenden Lose unterliegen.
- (4) Ein Los wird an einer Maschinengruppe zu Ende bearbeitet, Überlappung ist nicht möglich.

Detaillierte Prämissen zu den einzelnen Problemkreisen sind aus dem Abschnitt 3.2. zu entnehmen.

4. Realisierung eines EDV-Modells zur Simulation von Werkstattabläufen

4.1. Aufbau und Inhalt des Modells





Auftrags-Bericht 1

Bericht über abgeschlossene Aufträge:

- Anzahl der Aufträge
 - Auftragswert
 - Mittlere Durchlaufzeiten
 - Anzahl der Terminverspätungen
 - Mittlere Terminverspätung
- jeweils gesondert je Produkt und gesamt
(Summe bzw. Mittelwert)

Auftrags-Bericht 2

Bericht über Aufträge, die sich noch in der Fertigung befinden:

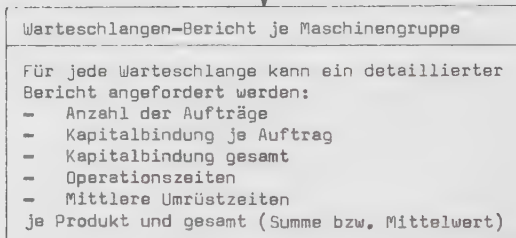
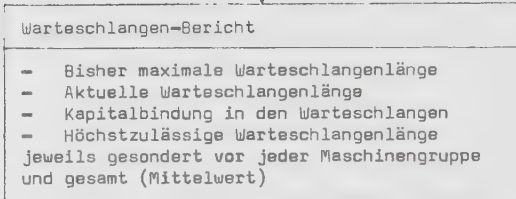
- Anzahl der Aufträge
 - Kapitalbindung in der Fertigung
 - Durchschnittliche Wartezeit eines Auftrages vor einer Maschinengruppe
 - Übergangszeiten
- jeweils gesondert je Produkt und gesamt
(Summe bzw. Mittelwert)

Auftrags-Bericht: Status-Berichte

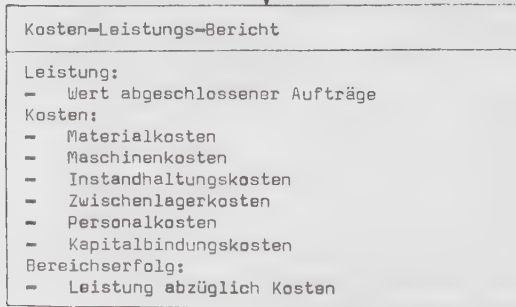
Für jedes Produkt kann ein Status-Bericht angefordert werden:

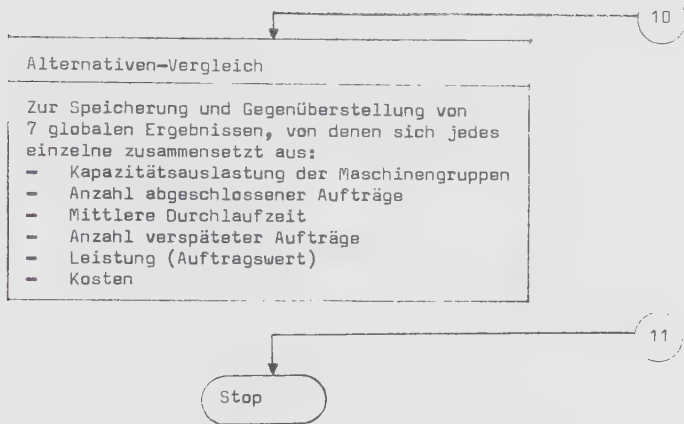
- Bearbeitungsreihenfolge
 - Auftragszahl im Übergangsstatus
 - Auftragszahl im Wartestatus
 - Auftragszahl im Bearbeitungsstatus
- jeweils gesondert je Station und gesamt

8



9





Kommandosteuerung		
Es stehen folgende Kommandos zur Verfügung:		
- BEGINN:	Neubeginn des Dialogs	- 1 -
- DATEN :	Wahl der Stammdaten-Nummer	- 2 -
- E1 :	Entscheidungsebene 1	- 3 -
- E2 :	Entscheidungsebene 2	- 4 -
- S1 :	Simulationsbeginn von vorn	- 5 -
- S2 :	Fortsetzung der Simulation	- 5 -
- A1 :	Maschinengruppen-Bericht	- 6 -
- A2 :	Auftrags-Bericht 1	- 7 -
- A3 :	Warteschlangen-Bericht	- 8 -
- A4 :	Kosten-Leistungs-Bericht	- 9 -
- A5 :	Alternativen-Vergleich	-10 -
- OFF :	Ende des Dialogs	-11 -

4.2. Beschreibung der Eingabedaten

4.2.1. Systemparameter

Bei der Programmkonzeption wurde darauf geachtet, daß innerhalb des Programms möglichst wenige Konstanten auftreten. Stattdessen wurden Variable eingeführt, die im Rahmen einer Initialisierung beim Laden des Systems mit ihren Anfangswerten versehen werden.

Dabei kann grundsätzlich zwischen folgenden Formen unterschieden werden:

- (1) Parameterwerte können zwar verändert werden, allerdings erfordert dies meist weitere Programmkorrekturen. (In der Regel sind jedoch dazu nur Änderungen an den im Programm reservierten Feldern notwendig.) Die Formulierung als Systemparameter erfolgte lediglich im Hinblick auf spätere Erweiterungen und Umstellungen des Programms. Dazu gehören:
 - Höchstzulässige Länge der Ereignisliste (= 1000)
 - Obergrenze für die Eingabe der maximalen Länge je Warteschlange (= 100)
 - Anzahl der Maschinengruppen (= 9)
 - Anzahl der Produkte (= 9)
- (2) Eine beliebige Festlegung der Parameterwerte ist bei jedem Ladevorgang des Systems möglich. Dazu gehören Werte wie:
 - Anzahl der Aufträge, die zu Beginn der Simulation zur Bearbeitung anstehen
 - Entscheidungsvariable, ob weitere Aufträge nachträglich generiert werden sollen oder nicht (dynamischer oder statischer Ankunftsprozeß entsprechend Abschnitt 3.2.1.1.):
 - 0: dynamischer Ankunftsprozeß
 - 1: statischer Ankunftsprozeß
 - Mittlere Zwischenankunftszeit
 - Multiplikator für Zufallszahlengenerator: Auftragsfolge
 - Multiplikator für Zufallszahlengenerator: Zwischenankunftszeiten

- Maximal zulässige Anzahl der Aufträge im System
- Übergangszeit u je Entfernungseinheit
(vgl. Abschnitt 3.2.1.4.4.)
- Zulässige Stammdaten-Nummern
- Entscheidungsvariable, ob Personal austauschbar ist
oder nicht:
0: austauschbar
1: nicht austauschbar
- Zinssatz für gebundenes Kapital je Zeiteinheit
- Mittlere Laufzeit je Maschinengruppe (für alle
Reparaturteile einheitlich)
- Multiplikatoren für Zufallszahlengenerator; Laufzeiten
- Dauer von Zufallsreparaturen
- Dauer planmäßiger Instandhaltungsarbeiten
- Verzögerungsfaktor für neue Aufträge
- Entscheidungsvariable zur Ausgabe von Ergebniszeilen
0: Ausgabe erwünscht
1: keine Ausgabe erwünscht

(3) Parameterwerte dienen lediglich zum Setzen von Anfangswerten, die nachträglich wieder verändert werden können. Dadurch werden zeitraubende Eingaben zu Beginn des Dialoges vermieden ⁵⁵⁾:

- Auftragsverteilung
- Faktor zur Berechnung der Soll-Durchlaufzeiten
- Anzahl installierter Maschinen, dieselben Werte gelten für
den Maschineneinsatz
- Personalbestand, dieselben Werte gelten für den Personaleinsatz
- Layout
- Kapazität der Zwischenlager
- Prioritätsregel:
1: FCFS
2: Kombinierte dynamische Prioritätsregel
- Instandhaltungsintervalle

⁵⁵⁾ vgl. hierzu insbesondere die Beschreibung der Eingabedaten im Dialog in den Abschnitten 4.2.3. und 4.2.4.

Die Festlegung der Systemparameter erfolgt normalerweise off-line (über Lochkarten). Die wichtigsten Werte können jedoch zusätzlich in einem On-line-Generierungsprozeß gesetzt bzw. verändert werden. Die Benutzer sollen aber mit dieser Wahlfreiheit nicht konfrontiert werden, weil dadurch das Modell an Übersichtlichkeit einbüßt und fehlerhafte Eingaben leicht möglich sind. Um dem Systembetreuer diesen Weg jedoch offenzuhalten, ist eine Sprungmöglichkeit zu dieser Ebene aus dem "Begrüßungsbild" über das "BEGINN"-Kommando vorgesehen.

4.2.2. Stammdaten

In den Stammdaten sind sowohl Elemente von Fertigungsvorschriften als auch von Betriebsmitteldaten enthalten. Im einzelnen handelt es sich dabei um folgende Größen:

- | | |
|--|-----------------------------|
| (1) Bearbeitungsreihenfolgen b_{ij} | (vgl. Abschnitt 3.2.1.3.) |
| (2) Stückzeiten o_{ij} | (vgl. Abschnitt 3.2.1.4.) |
| (3) Rüstzeiten $r_{i,j,k}$ | (vgl. Abschnitt 3.2.1.4.1.) |
| (4) Losgrößen l_j^p | (vgl. Abschnitt 3.2.1.5.) |
| (5) Produktwerte p_j^p | (vgl. Abschnitt 3.2.1.6.) |
| (6) Materialgemeinkostensatz α | (vgl. Abschnitt 3.2.4.) |
| (7) Materialeinzelkosten β_j | (vgl. Abschnitt 3.2.4.) |
| (8) Fixe Maschinenkostensätze γ_i | (vgl. Abschnitt 3.2.4.) |
| (9) Variable Maschinenkostensätze δ_i | (vgl. Abschnitt 3.2.4.) |
| (10) Instandhaltungskostensätze ϵ | (vgl. Abschnitt 3.2.4.) |
| (11) Lagerkostensätze τ_i | (vgl. Abschnitt 3.2.4.) |
| (12) Personalkostensätze μ | (vgl. Abschnitt 3.2.4.) |

Nach dem Einlesen der Stammdaten vom Plattenspeicher werden folgende Werte berechnet:

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| - Rüstzeiten $r_{i,j,k}^*$ | (vgl. Abschnitt 3.2.1.4.1.) |
| - Operationszeiten o_{ij}^* | (vgl. Abschnitt 3.2.1.4.2.) |
| - Fertigungszeiten f_j | (vgl. Abschnitt 3.2.1.4.3.) |
| - Produktwerte p_j^{p*} | (vgl. Abschnitt 3.2.1.6.) |

Insgesamt besteht die Möglichkeit, aus 5 verschiedenen Stammdatensätzen eine Auswahl zu treffen, wobei jeder Datensatz eine spezifische Werkstattumgebung repräsentiert.

4.2.3. Entscheidungsebene 1 ⁵⁶⁾

Diese Entscheidungsebene ist programmtechnisch dadurch gekennzeichnet, daß nach einer Unterbrechung des Simulationslaufes die Simulation mit den langfristig festgesetzten Eingabewerten neu begonnen werden muß. Willkürliche Veränderungen dieser Parameter und daraus resultierende praxisfremde Ergebnisse werden dadurch vermieden. Beispielsweise ist es nicht angebracht, während eines Simulationsablaufes die Maschinenanordnung zu verändern.

Im Dialog können folgende Daten in das Programm eingegeben werden:

(1) Auftragsverteilung.

Den Produkten $j = 1, \dots, 9$ können bei dieser Eingabe beliebige subjektive Gewichte zugeordnet werden, die das Programm in normierte Wahrscheinlichkeiten umrechnet. Sie legen fest, in welcher Häufigkeit Aufträge eines bestimmten Typs $j = 1, \dots, 9$ in der Werkstatt eintreffen.

(2) Soll-Durchlaufzeiten (Terminfixierung).

Wunschgemäß kann der Benutzer Soll-Durchlaufzeiten manuell eingeben oder sie durch das Programm berechnen lassen. Bei manueller Eingabe können für die Produkte $j = 1, \dots, 9$ Zeitwerte eingegeben werden. Im Falle einer Berechnung durch das Programm gibt der Benutzer den Faktor v zur Berechnung der Soll-Durchlaufzeiten s_j aus den Fertigungszeiten f_j an (vgl. Abschnitt 3.2.1.4.5.).

(3) Anzahl installierter Maschinen je Maschinengruppe (m_i^1).

Im Rahmen einer Kapazitätsfestlegung können den jeweiligen Maschinengruppen $i = 1, \dots, 9$ beliebige Zahlen zugeordnet werden.

⁵⁶⁾ vgl. Definition der strategischen Entscheidungen in Abschnitt 3.1.

(4) Personalbestand (p^1).

Fall 1: Personal ist laut Systemparameter zwischen Maschinengruppen austauschbar. Es können 9 Werte in beliebiger Höhe eingegeben werden. Vom System wird daraus die Summe berechnet (p^1) und dadurch der Gesamtbestand an Personal in der Werkstatt langfristig festgelegt. Gleichzeitig werden - zur Vereinfachung der Eingabe - die Werte auf die kurzfristige Ebene übertragen und gehen in das Modell als Personaleinsatz p_i^2 ein, falls sie nicht in Entscheidungsebene 2 nochmals verändert werden.

Fall 2: Personal ist laut Systemparameter zwischen Maschinengruppen nicht austauschbar. Es können 9 Werte in beliebiger Höhe eingegeben werden. Damit ist der Personaleinsatz p_i^2 langfristig festgelegt und kann in Entscheidungsebene 2 nicht mehr verändert werden.

(5) Anordnung von Maschinengruppen (Layout).

Am Bildschirm erscheint ein 6×6 -Raster von 36 Stellplätzen. Jede Maschinengruppe $i = 1, \dots, 9$ kann an einem beliebigen Stellplatz angeschlossen werden. Je Eingabe wird eine Maschinengruppe aufgestellt, wofür 3 Werte erforderlich sind: Nummer der Maschinengruppe, Zeilennummer und Spaltennummer des Rasters. Anschließend werden vom Programm die Übergangszeiten $u_{i_1 i_2}^*$ zwischen den Maschinengruppen berechnet (vgl. Abschnitte 3.2.1.4.4. und 3.2.2.1.).

(6) Kapazität der Zwischenlager (l_i^w).

Für die maximal zulässige Länge der Warteschlangen werden 9 Werte $l_i^w \leq 100$ oder kleiner gleich dem als Systemparameter (vgl. Abschnitt 4.2.1.) festgelegten Wert eingegeben.

4.2.4. Entscheidungsebene 2 ⁵⁷⁾

Nach der Variation von Einflußgrößen auf dieser Ebene kann wahlweise mit der Simulation von vorn begonnen oder der unterbrochene Simulationslauf fortgesetzt werden. Der ersteren Möglichkeit wird man sich bedienen, wenn Alternativen über denselben Zeitraum und unter sonst gleichen Bedingungen getestet werden sollen. Letztere Vorgehensweise gestattet die Beobachtung des Werkstattablaufes über mehrere Zeitintervalle hinweg, deren Länge ebenfalls wahlweise bestimmt werden kann. Dabei besteht die Möglichkeit, nach jeder Unterbrechung des Simulationslaufes durch Parametervariation auf veränderte Bedingungen (z.B. Kapazitätsauslastung) zu reagieren. Folgende Einflußgrößen können im Dialog verändert werden:

(1) Externe Prioritäten.

Für den Fall, daß die kombinierte dynamische Prioritätsregel gewählt und dem Kriterium "Externe Priorität" ein Gewicht ungleich Null zugeteilt wurde, kann man Produkte $j = 1, \dots, 9$ mit externen Prioritäten versehen. Bei negativer Gewichtung des Kriteriums innerhalb der KOMBI-Regel sind bei der Eingabe vorzuziehende Produkte mit hohen Werten zu versehen. Bei positiver Gewichtung erhalten Produkte mit der niedrigsten Ziffer die höchste Priorität (vgl. zum besseren Verständnis Punkt (2) dieses Abschnitts).

(2) Interne Prioritätskriterien.

Eine kombinierte dynamische Prioritätsregel steht mit folgenden Kriterien zur Verfügung (vgl. Abschnitt 3.2.1.7.):

- Ankunftszeit in der Werkstatt
- Operationszeiten
- Fertigungszeiten
- Restfertigungszeiten
- Umrüstzeiten
- Schlupfzeiten
- Produktwerte
- Warteschlangenlänge an der Folgemaschine
- Externe Prioritäten

⁵⁷⁾ vgl. Definition der taktischen Entscheidungen in Abschnitt 3.1.

Dabei ist für die Kriterien $k = 1, \dots, 9$ je eine Eingabe für die Gewichte e_k erforderlich, die folgende Werte annehmen dürfen:

$e_k = 0$: Kriterium bleibt unberücksichtigt

$e_k > 0$: Aufträge mit den niedrigsten Kriterienausprägungen werden bevorzugt

$e_k < 0$: Aufträge mit den höchsten Kriterienausprägungen werden bevorzugt

Zum besseren Verständnis der Funktionsweise der kombinierten dynamischen Prioritätsregel sei auf Tab. 5 verwiesen (vgl. ausführliche Beschreibung in Abschnitt 3.2.1.7.). Darin wird deutlich, wie sich eine Veränderung der Gewichtungsziffern beim Kriterium "Umrüstzeiten" von "1" auf "4" und beim Kriterium "Schlupfzeiten" von "4" auf "1" auf die Priorität der Aufträge auswirkt (geänderte Zahlen in Klammern): Im ersten Fall wird Auftrag 1, im zweiten Fall Auftrag 4 vorgezogen.

(3) Losgröße.

Für die Produkte $j = 1, \dots, 9$ können beliebige Losgrößen l_j^p eingegeben werden. Im Zusammenhang mit dieser Eingabe empfiehlt sich ein Neubeginn der Simulation, da sonst Ergebnisverzerrungen auftreten können.

(4) Bearbeitungsreihenfolge.

Für jedes Produkt $j = 1, \dots, 9$ können maximal neun Werte für die Bearbeitungsreihenfolge b_{1j} eingegeben werden, wobei der Eingabevektor zwischen ein und neun Stellen lang sein und Wiederholungen enthalten kann. Gegenüber der in den Fertigungsvorschriften enthaltenen Maschinenfolge muß der Eingabevektor jedoch dieselben Elemente enthalten wie zuvor, nur Vertauschungen sind möglich. Diese Vorschrift ist auch plausibel, da gewöhnlich Arbeitsplanvarianten ein und desselben Produktes die gleichen Arbeitsgänge aufweisen müssen.

Die Simulation sollte nach der Eingabe von neuem begonnen werden.

(5) Maschineneinsatz.

Für jede Maschinengruppe $i = 1, \dots, 9$ kann die Anzahl der eingesetzten Maschinen m_i^2 eingegeben werden. Sie darf die Anzahl der installierten Maschinen m_i^1 bei keiner Maschinengruppe überschreiten.

(6) Personaleinsatz.

Für jede Maschinengruppe $i = 1, \dots, 9$ kann nur dann der Personalbestand p_i^2 verändert werden, wenn dies laut Systemparameter zulässig ist. In diesem Fall darf die durch den Gesamtbestand des Personals p^1 festgelegte Anzahl nicht überschritten werden.

(7) Instandhaltungsintervalle.

Für jede Maschinengruppe $i = 1, \dots, 9$ kann ein Instandhaltungsintervall angegeben werden.

(8) Fabrikkalendertag, Uhrzeit.

Diese Eingabe ermöglicht es, für den Simulationslauf einen Startzeitpunkt einzustellen. Die Simulationsuhr läuft synchron mit der Simulationszeit ab dem hier eingestellten Zeitpunkt. Während eines Simulationslaufes können über diese Eingabemöglichkeit Arbeitsende und Wiederaufnahme der Produktion festgelegt werden. Diese Entscheidung beeinflusst insbesondere die Entwicklung der Werkstattkosten (vgl. Abschnitt 3.2.4.).

4.2.5. Programmsteuerung

Neben Parametereingaben dienen verschiedene Zeichenkombinationen und Zahlen zur Steuerung des Dialogs entsprechend dem Benutzerwunsch. Numerische Eingaben dienen zur

- Wahl zwischen Neubeginn und Fortsetzung der Simulation,
- Festsetzung des gewünschten Intervalls, nach dem die Unterbrechung des Simulationslaufes gewünscht wird,
- Wahl zwischen den verschiedenen Ergebnisdarstellungen und
- Entscheidung über die Fortsetzung des Dialogs nach der Ergebnispräsentation.

Neben numerischen Eingabemöglichkeiten gibt es eine umfassende Kommandosteuerung, mit deren Hilfe wichtige Stützpunkte im Dialog wahlfrei angesprungen werden können.

Beide Steuerungen sind in demselben System realisiert, um einerseits "Anfängern" die Möglichkeit zu bieten, ohne tiefe Kenntnis des Systems mit dem Programm zu arbeiten, andererseits "Fortgeschrittenen" eine einfache Handhabung ohne viele Umwege im Dialog zu ermöglichen (vgl. Abschnitt 2).

Die Liste der möglichen Steuerbefehle ist aus Abschnitt 4.1. zu entnehmen.

4.3. Simulationskern

4.3.1. Wichtige Bausteine des Simulators

Der Simulationskern besteht im wesentlichen aus den folgenden Bestandteilen ⁵⁸⁾:

(1) Initialisieren (INIT).

In diesem Programmteil werden Anfangswerte gesetzt, wenn die Simulation von vorn begonnen werden soll.

(2) Zufallszahlengenerator (ZUFGEN).

Nach der in Abschnitt 3.2.3. beschriebenen Methode werden gleichverteilte Zufallszahlen zwischen 1 und 9999 generiert. Bei den einzelnen Einsatzzwecken werden diese

- für Produktnummern an der aus der Auftragsverteilung errechneten diskreten Verteilungsfunktion gespiegelt und dementsprechend Zahlen zwischen 1 und 9 erzeugt (ZUFGEN 1);
- für Ankunftszeiten zunächst mit einem Faktor multipliziert, der sich aus der Relation von gewünschter mittlerer Zwischenankunftszeit und der Mitte des obengenannten Zufallszahlenbereichs (5000) ergibt. Der gewonnene Wert wird zur Ankunftszeit desjenigen Auftrags addiert, der zuletzt in die Fertigung eingeschleust wurde (ZUFGEN 2);

⁵⁸⁾ Die Bezeichnungen entsprechen den im Programm verwendeten abgekürzten Kommentaren.

- für Laufzeiten ebenfalls mit dem Faktor multipliziert, der sich aus dem Verhältnis von gewünschter Laufzeit zur Zahl 5000 ergibt (ZUFGEN 3).

(3) Ergänzen Ereignisliste (ELIST).

Sortierkriterium in der Ereignisliste ist die Simulationszeit (zeitliche Abfolge der Ereignisse). Dementsprechend muß jedes neu hinzukommende Ereignis eingespeichert werden.

Hinzu kommt ein Reorganisationsteil, in dem Elemente, die vom Programm nicht mehr angesprochen werden, aus der Liste gelöscht werden. Dieser Programmteil wird dann angesprungen, wenn sich neue Ereignisse aufgrund von Speicherplatzbeschränkungen nicht mehr einreihen lassen.

(4) Aktivieren Maschinengruppe (AKTIV).

In diesem Programmteil wird ein Auftrag auf eine Maschinengruppe gebracht. Dazu gehören Berechnungen wie kumulierte ablaufbedingte Leerzeiten, umrüstbedingte Leerzeiten, evtl. anfallende Instandhaltungszeiten im Laufe des bevorstehenden Bearbeitungsganges, Operationszeiten und die Ermittlung des Abschlußtermines an der betreffenden Maschinengruppe.

(5) Ergänzen Warteschlange (EWART).

Dieser Baustein wird eingesetzt, wenn eine Maschinengruppe zur Bearbeitung eines anstehenden Auftrags nicht frei ist. Da die Warteschlangen sequentiell organisiert sind (jeder neu hinzukommende Auftrag wird in die nächsthöhere Speicherstelle eingereiht), ist dieser Teil relativ einfach aufgebaut.

(6) Abschließen Auftrag (AUFEND).

Ist das Ereignis "Abschluß eines Arbeitsganges" erreicht und die betreffende Maschinengruppe die letzte Station eines Auftrags, kommt dieser Programmteil zur Anwendung. Dazu gehören die Berechnung der Durchlaufzeit, ggf. der Terminverspätung und die Aktualisierung von Kennzahlen wie "mittlere Durchlaufzeit", "mittlere Terminverspätung" und "Anzahl verspäteter Aufträge".

(7) Entnahme aus der Warteschlange (PRIOR).

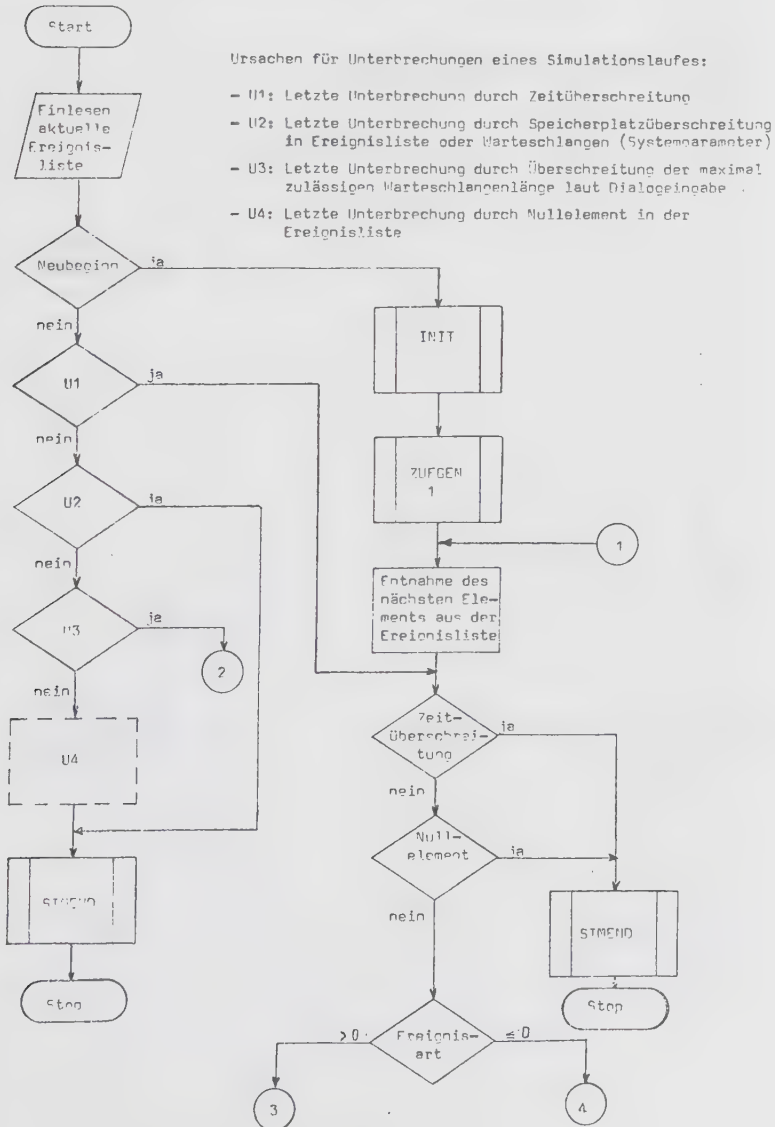
Dieser Programmteil wird angesteuert, wenn eine Maschinen-
gruppe frei geworden ist und sich mehr als ein Auftrag in
der Warteschlange befindet. Er besteht im wesentlichen aus
der einfachen Entnahmevorschrift "FCFS" und der umfangreichen
kombinierten dynamischen Prioritätsregel. Der Baustein sorgt
für die Auswahl und Entnahme des Auftrags mit der höchsten
Priorität und für die anschließende Reorganisation der
Warteschlange.

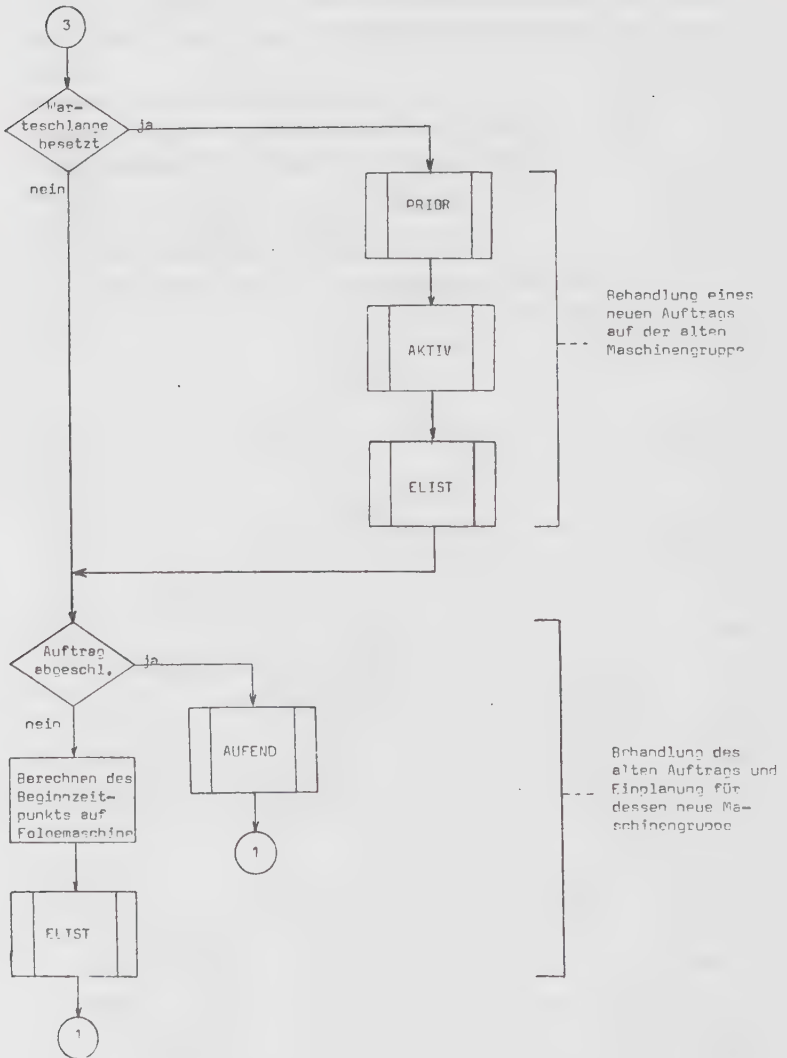
(8) Beenden Simulation (SIMEND).

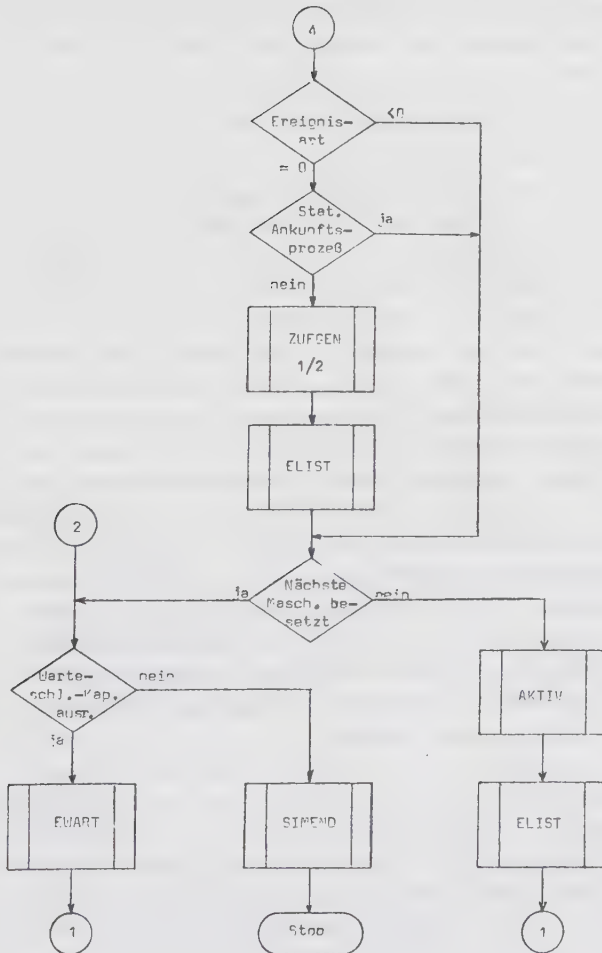
Bei Unterbrechung der Simulation werden wichtige Kenndaten,
die für das Simulationsergebnis wesentlich sind, berechnet.

4.3.2. Grobflußplan des Simulators

Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Modulen soll in folgendem Grobflußplan verdeutlicht werden:







4.3.3. Simulationsablauf

Aus Gründen der Speicherplatzersparnis wird die Ereignisliste bei Unterbrechung eines Simulationslaufes auf Externspeicher (Magnetplatte) ausgelagert und bei dessen Neubeginn bzw. Fortsetzung wieder eingelesen.

Im Anschluß daran werden folgende Abfragen durchgeführt:

(1) Neubeginn oder Fortsetzung der Simulation.

Bei "Neubeginn" werden Anfangswerte gesetzt (INIT), Zufallszahlen für die anfangs vor dem System liegenden Aufträge erzeugt (ZUGFGEN 1) und das erste Element aus der Ereignisliste entnommen. Die Simulation wird so fortgesetzt wie nach jeder Entnahme eines nächstfolgenden Elements aus der Ereignisliste. Bei "Fortsetzung" kommt Punkt (2) zur Anwendung.

(2) Die "normale" Unterbrechung eines Simulationslaufes erfolgt durch Überschreitung des vorgegebenen Zeitintervalls. Bei zeitbedingter Unterbrechung ist die Simulation im nächsten Lauf an der Stelle fortzusetzen, wo sie unterbrochen wurde, d.h. mit der erneuten Abfrage, ob das vorgegebene Intervall wiederum überschritten wird.

(3) Durch begrenzten Speicherraum bei den Warteschlangen und der Ereignisliste kann es möglich sein, daß der Simulationslauf unterbrochen werden muß und nicht mehr fortgesetzt werden kann (vgl. Bemerkungen zur Kapazität des Gesamtsystems in Abschnitt 3.2.3.). Eine Sperre verhindert die Weiterführung des Simulationslaufes (SIMEND).

(4) Wurde der Simulationslauf durch zu geringe Zwischenlegerkapazität unterbrochen, ist es nur über den Weg der Kommando-steuerung (S2) möglich, die Simulation fortzusetzen. Dabei wird ebenfalls an die Stelle verzweigt, an welcher der Lauf unterbrochen wurde, nämlich an die Abfrage, ob ein zusätzlicher Auftrag in eine Warteschlange eingereiht werden kann.

(5) Für den Fall, daß alle obigen Abfragen verneint werden müssen, hat der Benutzer offensichtlich versucht, trotz eines Leerelements in der Ereignisliste die Simulation fortzusetzen. Sind nämlich bei einem statischen Ankunftsprozeß sämtliche Aufträge ausgeführt, ist es sinnlos, in der Simulation fortzufahren (SIMEND).

Nach jeder Entnahme eines neuen Elements aus der Ereignisliste erfolgt eine Prüfung, ob das Simulationszeitintervall bereits überschritten ist, was eine Unterbrechung zur Folge hat (SIMEND). Im anderen Fall fragt das Programm ab, ob es sich um ein Leerelement handelt, um den Simulationslauf ggf. abzubrechen (SIMEND).

Ist kein Grund für eine Unterbrechung gegeben, fährt das Programm mit der Abfrage der Ereignisart fort. Drei Klassen von Ereignissen können im Programm auftreten:

- (1) Abschluß eines Arbeitsgangs: Ereignisart > 0
- (2) Ankunft eines Auftrags in der Werkstatt: Ereignisart = 0
- (3) Ende des Übergangs (Ankunft an einer Maschinengruppe):
Ereignisart < 0

Zu (1):

Die Maschinengruppe ist frei geworden und soll einen Nachfolge-Auftrag erhalten. Dazu wird entsprechend der Prioritätenvorgabe ausgewählt (PRIOR), die Maschinengruppe aktiviert (AKTIV) und das Bearbeitungs-ende des neuen Auftrags in die Ereignisliste eingereiht (ELIST). Anschließend bzw. dann, wenn die Warteschlange nicht besetzt war, überprüft das Programm den alten Auftrag daraufhin, ob seine Bearbeitung abgeschlossen ist. In diesem Fall nimmt es den Auftrag aus dem System heraus (AUFEND) und springt zum nächstfolgenden Ereignis. Ist der Auftrag noch nicht fertig, zieht das System die Übergangszeiten heran, um den Beginnzeitpunkt an der nächsten Maschinengruppe festzulegen. Nach der Speicherung dieses Wertes in der Ereignisliste (ELIST) wird dort das nachfolgende Element entnommen.

Zu (2) und (3):

Kommt ein neuer Auftrag in der Werkstatt an (2), so ist im Fall eines dynamischen Ankunftsprozesses ein "zukünftiger" Auftrag mit Nummer und Ankunftszeit zu erzeugen (ZUFGEN 1/2), und dessen Daten sind in die Ereignisliste einzusortieren (ELIST). Anschließend bzw. dann, wenn es sich lediglich um das Ende eines Übergangs von bereits eingeschleusten Aufträgen handelt (3), folgt eine Prüfung, ob die nächste Maschinengruppe besetzt ist. Ist sie frei, leitet das Programm deren Aktivierung unter besonderer Berücksichtigung bisher angefallener

Leerzeiten ein. Anschließend sortiert es die Daten des Arbeitsganges in die Ereignisliste ein (ELIST). Die Simulation wird mit dem nachfolgenden Element der Ereignisliste fortgesetzt.

Ist die Maschinengruppe infolge Belegung nicht in der Lage, den Auftrag sofort zu bearbeiten, muß dieser in eine hierfür vorgesehene Warteschlange eingereiht werden (EWART). Dazu ist allerdings eine ausreichende Zwischenlagerkapazität Voraussetzung, andernfalls wird der Simulationslauf unterbrochen (SIMEND).

4.4. Beschreibung der Ausgabedaten

Am Anfang des Ausgabeteils erscheint eine Übersicht, welche die hauptsächlichen Möglichkeiten der Ergebnisaufbereitung präsentiert:

- (1) Maschinengruppen-Bericht
- (2) Auftrags-Bericht
- (3) Warteschlangen-Bericht
- (4) Kosten-Leistungs-Bericht
- (5) Alternativen-Vergleich

Diese Ergebnisse können wahlweise und in beliebiger Reihenfolge abgerufen werden.

4.4.1. Maschinengruppen-Bericht

Diese Informationen dienen hauptsächlich zur Auskunft über die Kapazitätsauslastung der einzelnen Maschinengruppen und des ganzen Maschinenparks.

Dazu gehören folgende Daten:

- (1) Ablaufbedingte Leerzeiten.

In den Fällen, in denen eine Maschinengruppe vor einer Neubeleugung leergestanden hat, wird das Zeitintervall von der Neubesetzung bis zum Bearbeitungsende des zuletzt bearbeiteten Auftrags zurückgerechnet ermittelt und den ablaufbedingten Leerzeiten hinzuaddiert. Bei Unterbrechung des Simulationslaufes berechnet das Programm bei momentan unbelegten Maschinengruppen die Zeitspanne zwischen Unterbrechungstermin und dem letzten

Bearbeitungsende. Ablaufbedingte Leerzeiten geben einen wichtigen Hinweis auf die Regelmäßigkeit des Produktionsflusses und sind als Kriterium für mögliche Kapazitätsglättungsmaßnahmen anzusehen.

(2) Umrüstbedingte Leerzeiten.

Umrüstzeiten fallen beim Sortenwechsel an und werden je Maschinengruppe zu umrüstbedingten Leerzeiten akkumuliert. In dem in Abschnitt 3.2.5. aufgebauten Zielsystem wird deutlich, daß eine Verringerung der Umrüstzeiten - im Gegensatz zu den ablaufbedingten Leerzeiten - sowohl zur Beschleunigung des Auftragsdurchlaufes als auch zur Verbesserung der Kapazitätsauslastung beitragen kann.

(3) Leerzeiten durch planmäßige Instandhaltung.

Zur besseren Beurteilung einer eingeschlagenen Instandhaltungsstrategie dient die Gegenüberstellung von Leerzeiten durch planmäßige Instandhaltung und

(4) Leerzeiten durch Zufallsausfälle.

Beide Werte stellen die akkumulierten Zeiten je Maschinengruppe dar. Daraus kann auf einfache Weise eine auf die speziellen Produktionsbedingungen zugeschnittene Funktion zwischen der Länge der Instandhaltungsintervalle einerseits und den Leerzeiten durch planmäßige Instandhaltung bzw. Zufallsausfälle andererseits ermittelt werden.

(5) Kapazitätsauslastung in Prozent.

Darunter wird die Beziehung zwischen angefallenen Lastlaufzeiten der Maschinengruppen und der Gesamtzeit ab dem Termin, zu dem die Maschinen erstmals in Betrieb gesetzt wurden, verstanden. Bei der Berechnung der Lastlaufzeiten wird von der Gesamtzeit abzüglich der Summe aller Leerzeiten ausgegangen.

(6) Übergangshäufigkeit.

Zur besseren Beurteilung der Güte einer Layoutentscheidung sollen die zehn Maschinengruppen-Paare, zwischen denen die

meisten Übergänge stattgefunden haben, vorgeführt werden. Damit kann in einer Folge-Entscheidung die Maschinenaufstellung im Hinblick auf die Übergangshäufigkeit zwischen Maschinengruppen überprüft werden.

4.4.2. Auftrags-Bericht

Im Auftrags-Bericht unterscheidet man grundsätzlich zwischen Informationen, die sich auf

- abgeschlossene Aufträge und auf
- in der Fertigung befindliche Aufträge

beziehen. Hinzu kommen spezielle Angaben über den Status einzelner Aufträge und die Übergangshäufigkeit.

(1) Bericht über abgeschlossene Aufträge.

Je Auftragskategorie erhält der Benutzer Informationen über Anzahl und Wert abgeschlossener Aufträge. Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse ist darauf zu achten, daß die Anzahl der Aufträge insgesamt zwar Aufschluß über die Produktionsgeschwindigkeit gibt, es sich dabei jedoch um Aufträge handelt, die unterschiedlich hohe Anforderungen an die Betriebsmittel stellen. Deshalb müssen auch die Einzelwerte je Produkt einer eingehenden Betrachtung unterzogen werden. Die Auftragswerte gehen als Leistungskomponenten in die Bereichserfolgsrechnung ein. Zusätzlich werden Kennzahlen wie mittlere Durchlaufzeiten, Anzahl der Terminverspätungen und Summe der Terminverspätungen ausgegeben. Diese Zahlen können erst in der späten Phase eines Simulationslaufes als repräsentativ angesehen werden, da zu Anfang gerade Aufträge mit hohen Wartezeiten noch nicht abgeschlossen sind und deren Werte naturgemäß noch nicht in die Berechnung obengenannter Kennzahlen eingehen können.

(2) Bericht über Aufträge, die sich noch in der Fertigung befinden.

Entsprechend der Darstellung abgeschlossener Aufträge werden auch hier zunächst Anzahl und Kapitalbindung der Aufträge in der Fertigung angezeigt. Dabei basiert die Kapitalbindung vereinfachend auf dem Wert des Endprodukts (vgl. Begründung

in Abschnitt 3.2.1.6.). Zusätzlich erscheint eine Information über die durchschnittliche Wartezeit eines Auftrags vor einer Maschinengruppe. Die Übergangszeiten sind als Ergebnis aus der Layoutplanung anzusehen.

(3) Status-Bericht.

Für jedes Produkt kann auf Wunsch ein Status-Bericht angefordert werden, der den aktuellen Stand der Aufträge in der Fertigung vorführen soll. Dabei wird, sortiert nach der Bearbeitungsreihenfolge, zwischen Aufträgen im Übergangs-, Warte- und Bearbeitungsstatus unterschieden.

4.4.3. Warteschlangen-Bericht

Der Benutzer kann sowohl eine Gesamtübersicht als auch Einzelberichte anfordern:

- (1) In einem Überblick über alle Warteschlangen wird die bisher maximale der aktuellen Länge der Warteschlangen gegenübergestellt. Dadurch ergibt sich ein Bild von dem im Laufe einer Simulation maximalen Bedarf an Zwischenlagerkapazität und der momentanen Warteschlangenbelegung. Diese Informationen lassen Schlüsse sowohl auf den Pufferlagerbedarf als auch auf die Auslastung einzelner Maschinengruppen zu. Die Kapitalbindung in den Warteschlangen unterscheidet sich von der gesamten Kapitalbindung in der Werkstatt und gibt Aufschluß darüber, welche Auftragswerte speziell in den Warteschlangen enthalten sind. Die maximal zulässige Warteschlangenlänge stellt die auf strategischer Ebene getroffene Entscheidung über die Pufferlagerkapazität dar.
- (2) Insbesondere bei einer großen Anzahl von Aufträgen in einer Warteschlange ist es sinnvoll, diese auf ihre Zusammensetzung zu überprüfen. Neben Anzahl und gesamter Kapitalbindung geben Einzelkriterien wie Kapitalbindung, Operationszeiten und durchschnittliche Umrüstzeiten je Auftrag wichtige Hinweise zur Wahl einer geeigneten Prioritätsregel, um den Abbau von Warteschlangen vor Engpässen zu gewährleisten. Dabei berechnen sich mittlere Umrüstzeiten aus dem arithmetischen Mittel der Umrüstzeiten aller Produkte auf das betrachtete.

4.4.4. Kosten-Leistungs-Bericht

Der Kosten-Leistungs-Bericht bietet einen absoluten Bewertungsmaßstab (vgl. Abschnitte 3.2.1.6. und 3.2.4.) für die Güte von Entscheidungen im Werkstattbereich. Darin wird die Summe der Produktwerte abgeschlossener Aufträge den Werkstattkosten gegenübergestellt. Die Kosten sind in die sechs Bestandteile zerlegt, die in Abschnitt 3.2.4. ausführlich dargestellt wurden. Aus der Differenz zwischen Leistung und Kosten resultiert der Bereichserfolg. Bei seiner Beurteilung ist darauf zu achten, daß er sich erst allmählich im Laufe einer Simulation auf ein Normalmaß einpendelt, da es einer gewissen Anlaufzeit bedarf, bis eine ausreichende Anzahl von Aufträgen abgeschlossen ist.

4.4.5. Alternativen-Vergleich

Der Anwender, der ein Simulationsexperiment durchführt, verliert leicht dadurch den Überblick, daß er seine Einzelergebnisse und deren Entwicklung im Laufe des Versuchs zwar mitverfolgen kann, sie jedoch während des Experiments allzu leicht vergißt. Deshalb wird ihm die Möglichkeit geboten, in Form einer Alternativen-Vergleich-Übersicht die wichtigsten Ergebnisse (maximal sieben) abzuspeichern und anschließend nach Wunsch abzurufen. Im Rahmen eines Vergleichstests von Prioritätsregeln kann er sich so z.B. verschiedene Ergebnisse, die er über denselben Planungszeitraum erzielt hat, "merken" und seine jeweils neueste Lösung mit den bisherigen Alternativen vergleichen. Ebenso ist es möglich, bei der Betrachtung der Simulation im Zeitablauf die Entwicklung einzelner Ergebnisgrößen anhand einer selbst aufgebauten Übersicht zu studieren.

5. Einsatz der Mensch-Maschine-Kommunikation als Mittel zur Entscheidungsfindung

5.1. Gestaltung des Modells als On-line-Simulator

Beim Übergang von der reinen Stapelverarbeitung von EDV-Programmen zur Mensch-Maschine-Kommunikation sind im wesentlichen zwei Entwicklungsstufen zu unterscheiden:

- (1) Im Rahmen eines Dialogsystems stehen dem Benutzer verschiedene Programme zur Verfügung, die er über Bildschirm oder Fernschreiber aufrufen kann. Je nach der Qualität des Dialogsystems tastet er auf mehr oder weniger komfortable Weise seine Eingabewerte ein und startet das gewünschte Programm, das ohne Unterbrechung zu Ende bearbeitet wird. Gegenüber der reinen Stapelverarbeitung liegt der Vorteil dieser Vorgehensweise in der komfortableren Handhabung und den dadurch bedingten besseren Testmöglichkeiten. Gegenüber dem Grundprinzip der Stapelverarbeitung (Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe) ändert sich jedoch grundsätzlich nichts, und es ist auch für den Programmierer mit relativ wenig Aufwand verbunden, ein fertiges Stapelverarbeitungsprogramm in einen Dialog-Rahmen einzubetten.
- (2) In einer weiteren Stufe ist auch das Kernprogramm bereits auf die Anwendung im Dialog ausgerichtet. Dazu gehören insbesondere
 - vom Programmierer vorgesehene und vom Benutzer beliebig zu definierende Schnittstellen, an denen das Programm unterbrochen werden kann,
 - Möglichkeiten für den Anwender, in den Programmablauf steuernd einzugreifen und die Fortsetzung des Programms mit geänderten Eingabewerten zu veranlassen.

Dadurch wird eine Variation der Einflußgrößen im Zeitablauf ermöglicht, und zum Vorteil einer komfortablen Handhabung kommt die Möglichkeit hinzu, gegenüber der konventionellen Arbeitsweise evtl. bessere Ergebnisse zu erzielen.

Das vorliegende System ist aus folgenden Gründen in die zweite Kategorie einzureihen und deshalb als On-line-Simulator zu bezeichnen:

- (1) Im Simulationskern existieren zahlreiche Möglichkeiten der Programmunterbrechung (vgl. Abschnitt 4.3.). Insbesondere können vom Benutzer jeweils unterschiedliche Zeitintervalle festgelegt werden, an deren Ende das nächste Zwischenergebnis erscheinen soll.
- (2) Die meisten Eingabewerte (z.B. Prioritätsregeln, Personalzuordnung, Instandhaltungsintervalle) können vom Benutzer zu jedem gewünschten Simulationszeitpunkt variiert und der Simulationslauf - ausgehend vom bisherigen Stand - fortgesetzt werden.

5.2. Basissoftware und technische Voraussetzungen

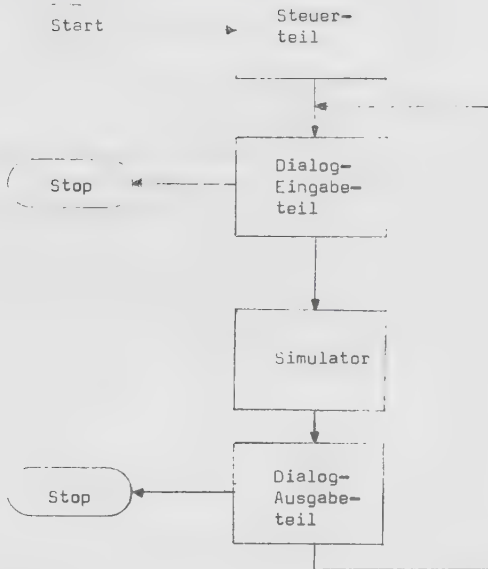
Das FORTRAN-Programm wurde auf der CD 3300 des Rechenzentrums der Universität Erlangen-Nürnberg installiert.

Die CD 3300 erlaubt kein Time-Sharing bei der Verarbeitung interaktiver Programme. Aufgrund der ständigen Speicherresidenz des Programms über den gesamten Dialog hinweg war es notwendig, es möglichst speicherökonomisch aufzubauen. Unter diesen Umständen mußte auf die einzige dort verfügbare Simulationssprache SIMULA verzichtet werden. Um diese Nachteile auszugleichen, wurde das Programm in einer Overlay-Struktur aufgebaut, die eine Speicherplatzersparnis ermöglicht.

Darin ist eine Teilung des Systems in folgende Segmente realisiert:

- (1) Steuerteil zum Aufruf der einzelnen Segmente,
- (2) Dialog-Eingabeteil zur Unterstützung der Parametervariation am Bildschirm (entspricht den beiden Entscheidungsebenen),
- (3) Simulator und
- (4) Dialog-Ausgabeteil zur Ergebnispräsentation.

Die Aufeinanderfolge dieser Segmente ist streng sequentiell in Form einer Endlosschleife organisiert. Möglichkeiten der Programmunterbrechung sind in die Dialogteile eingebaut:



Diese Vorgehensweise besitzt die Vorteile, daß

- das ständig geladene Steuersegment sehr wenig Kernspeicher benötigt und
- zu dem Steuersegment jeweils nur ein zusätzliches Segment speicherresident bleiben muß.

Die Dialogteile bauen auf Unterrouinen ⁵⁹⁾ auf, die im einzelnen folgende Funktionen besitzen:

- (1) Ausgaben von Textkonserven am Bildschirm (DISPOUT, WRITSCRN),
- (2) Eingabe von Zahlen und Zeichenketten über Bildschirm (DISPIN, DISPX),
- (3) Einfügen von Variablen in den Textkonservenbereich (TAB, BINDEZ),
- (4) Kopieren von Bildschirminhalten auf Drucker (HARDCO).

⁵⁹⁾ vgl. Reitbauer, F., Das Trainingssystem im Computerunterstützten Entscheidungstraining, Diss. Nürnberg 1973. Einige der dort beschriebenen Unterrouinen wurden an die speziellen Erfordernisse des vorliegenden Systems angepaßt.

Das Programm benötigt in der beschriebenen Form 50 QP Kernspeicher, eine Platteneinheit, einen Bildschirm und einen Schnelldrucker.

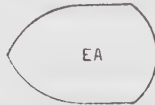
Die Wartezeiten beim Aufruf des Simulationskerns sind abhängig von der Besetzung von Ereignisliste und Warteschlangen, der gewählten Prioritätsregel, der zeitlichen Distanz der Ereignisse und dem gesetzten Unterbrechungsintervall. Deshalb kann ein Richtwert von 10 Sekunden Wartezeit für eine Stunde Simulationszeit nur als grobe Schätzung angesehen werden. Von der Wartezeit besteht erfahrungsgemäß ca. die Hälfte aus reiner Rechenzeit, während der Rest durch Kanalzeit und sonstige betriebssystembedingte Verwaltungsarbeiten verbraucht wird.

5.3. Dialogaufbau

5.3.1. Erläuterungen zu den Dialogablaufplänen

(1) Eingabeaufforderung (EA).

Es erscheint ein Text mit Eingabeaufforderung am Bildschirm. Der Benutzer erhält die für seine Entscheidung notwendigen Informationen. Dafür ist folgendes Symbol vorgesehen:



Ist nur das Drücken der Send-Taste erforderlich, wird dasselbe Symbol ohne den Zusatz "EA" verwendet.

(2) Manuelle Eingabe (E).

In dasselbe Bild, mit dem der Benutzer zur Entscheidung aufgefordert wird, kann die Eingabe von Zahlen oder Zeichenkombinationen über die Bildschirmtastatur erfolgen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem einfachen Drücken der Send-Taste nach Bildschirminhalten mit rein informativem Charakter und einer Eingabe mit anschließendem Drücken der Send-Taste bei Eingabeaufforderungen.

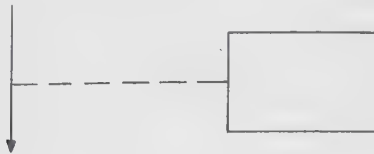
Für diesen Zweck wurde das Symbol



verwendet.

(3) Sonstige Operationen.

Obwohl Ein-/Ausgabevorgänge an Peripheriegeräten außer dem Bildschirm und Rechenoperationen nicht in einen Dialogablaufplan gehören, sollen sie zur besseren Gesamtübersicht des Programms trotzdem in groben Zügen aufgezeigt werden. Hierzu eignet sich folgende Symbolik:



(4) Prüfroutinen.

In den Dialogablaufplänen sind weder Plausibilitäts- noch Zulässigkeitsprüfungen der jeweiligen Eingabe vermerkt. Wird im ersteren Fall beispielsweise versehentlich bei der Wahlmöglichkeit zwischen zwei Alternativen eine dritte gewählt, erscheint ein Informationsbild über fehlerhafte Eingabe und ein nächstes mit Korrekturmöglichkeit. Auch bei unzulässigen Eingaben wie Überschreitung der Anzahl installierter Maschinen beim Maschineneinsatz wird eine Übersicht über mögliche Eingabefehler am Bildschirm ausgegeben. In beiden Fällen wird das Programm nach erneuter Eingabe an der Stelle fortgesetzt, an der es unterbrochen wurde. Diese Verzweigungen werden zur besseren Übersichtlichkeit nicht jedesmal in den Ablaufplänen erwähnt, sondern sind Inhalt folgender Darstellung (darin bezeichnet Bild y die momentan am Bildschirm erscheinende Maske und die Sprungmarke "18" die Fortsetzung des Dialogs entsprechend den in Abschnitt 5.3.2. gezeigten Flußdiagrammen):

Bild y

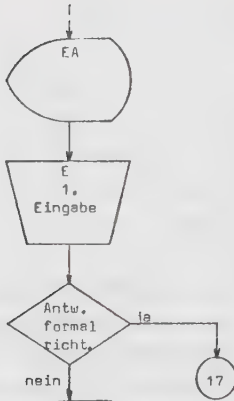


Bild 2/3

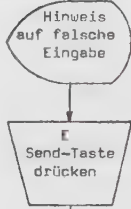


Bild y

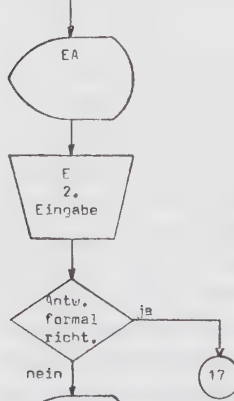


Bild 7

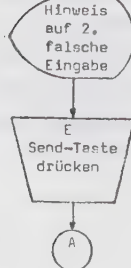


Bild y

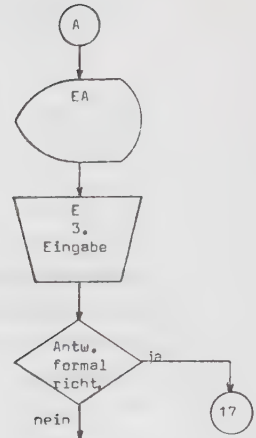
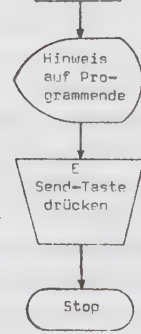
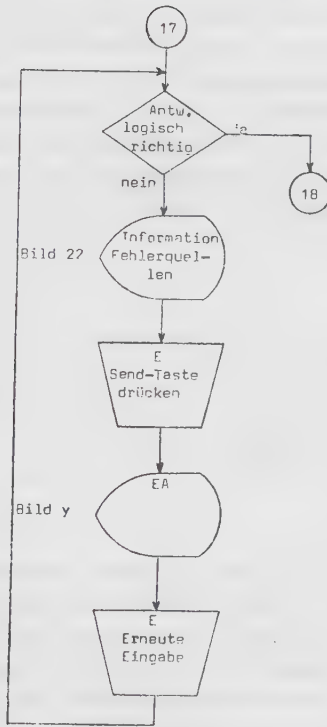


Bild 8



Bild 9





(5) Kommandosteuerung.

Im Rahmen der Plausibilitätsprüfung werden auch solche Eingaben als formal richtig erkannt, die aus bestimmten festgelegten Zeichenkombinationen bestehen. Jeder Befehl bezeichnet dabei eine bestimmte Sprungmarke, zu der das Programm (mit einigen Ausnahmen beim Dialogbeginn) von jeder beliebigen Position aus verzweigen kann. In den Ablaufplänen werden nicht die Abfragen nach jeder Eingabe, sondern lediglich die jedem Kommando zugewiesene Sprungmarke mit Großbuchstaben des jeweiligen Befehls gekennzeichnet.

Beispiel:



Neben dem in Abschnitt 4.1. beschriebenen Befehlsvorrat existieren die Kommandos

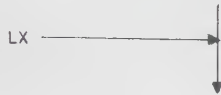
- LET und
- COPY.

Ihnen sind keine eigenen Sprungmarken zugeordnet, und sie werden deshalb in der allgemeinen Kommandoliste nicht erwähnt (vgl. Abschnitt 4.1.). Mit Hilfe des Befehls "LET" kann trotz Eingabeaufforderung auf eine Eingabe verzichtet werden. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn der Benutzer versehentlich in einen Programmzweig gelangt ist, wo er keine Parameter ändern möchte. Auch besteht die Möglichkeit, sich in einem ursprünglich als Eingabeaufforderung konzipierten Text die aktuelle Einstellung der Einflußgrößen anzusehen, ohne sie nochmals mühsam eintasten zu müssen. Mit dem Befehl "COPY" können Bildschirminhalte am Schnelldrucker ausgegeben werden. Bei beiden Kommandos verzweigt das Programm je nach Dialogfortschritt an eine andere Stelle.

Die Symbolik

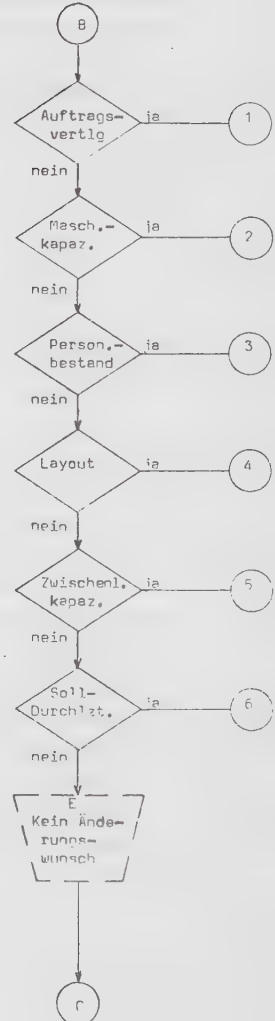
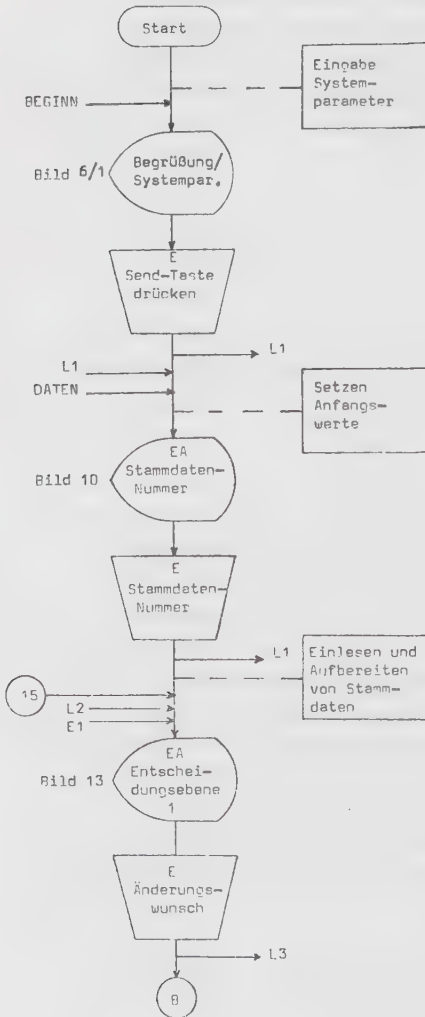


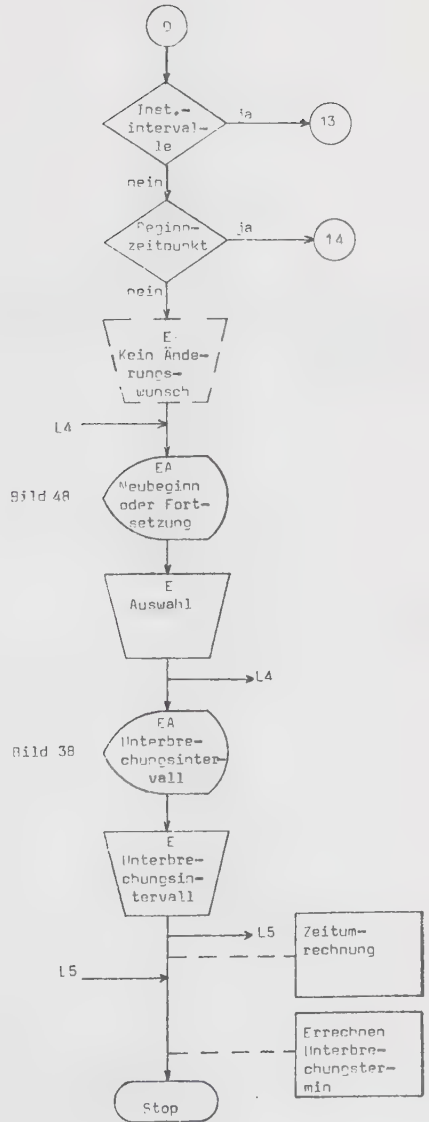
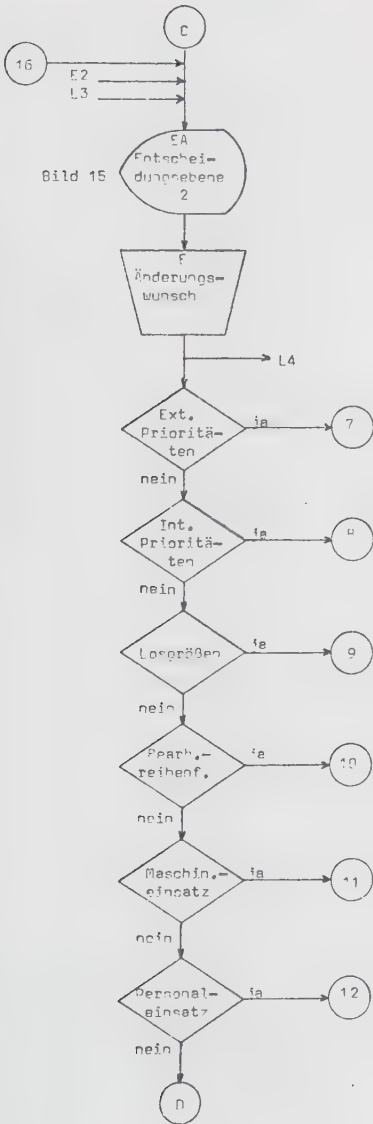
bedeutet dabei, daß das Programm nach einem dieser Befehle zu der Marke LX verzweigt. Dies ist gekennzeichnet durch:

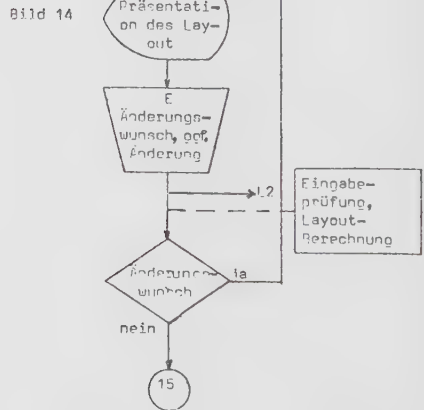
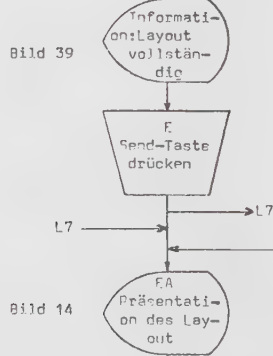
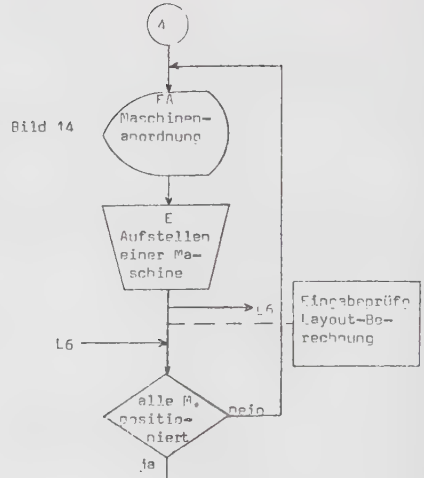
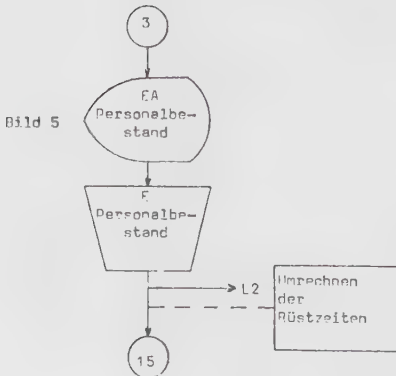
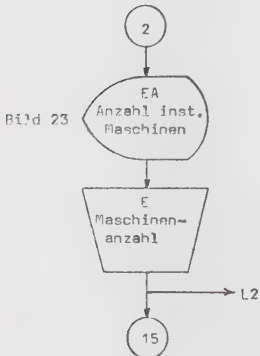
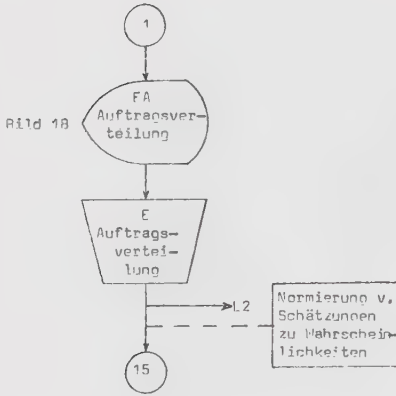


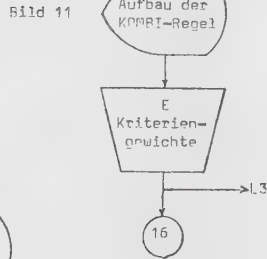
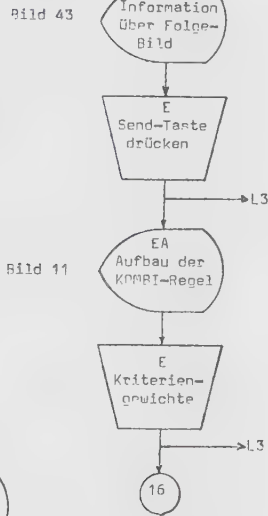
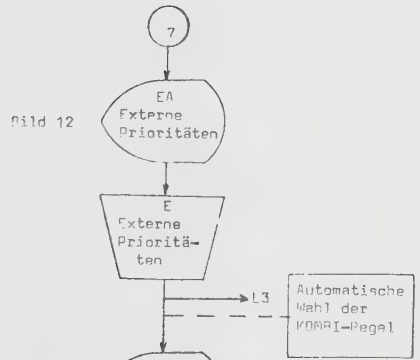
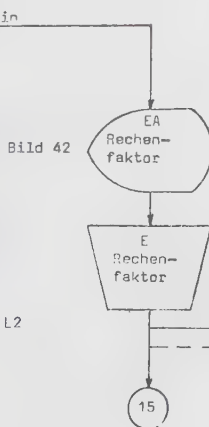
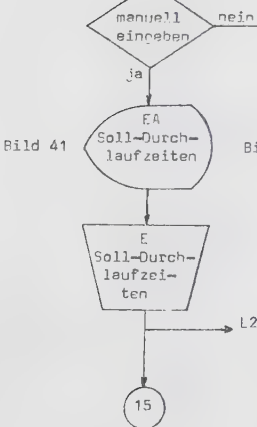
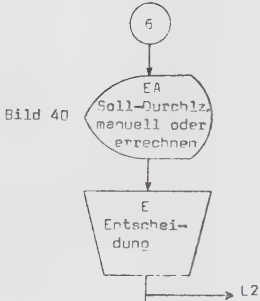
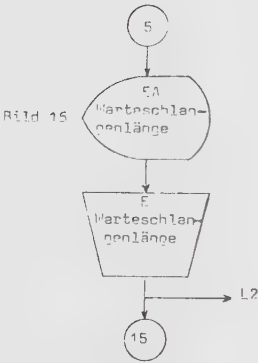
5.3.2. Dialogablaufpläne

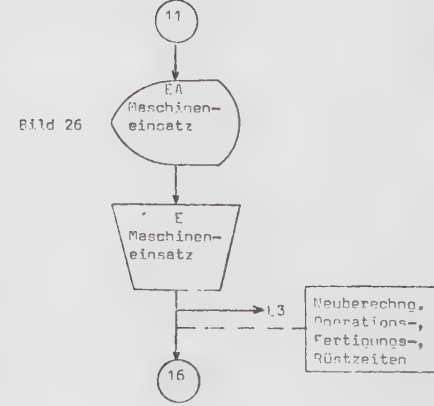
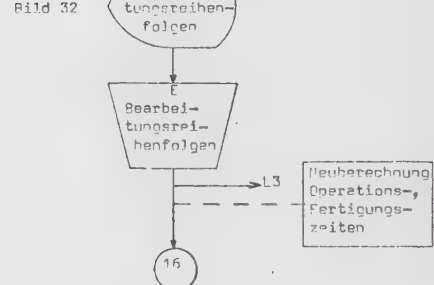
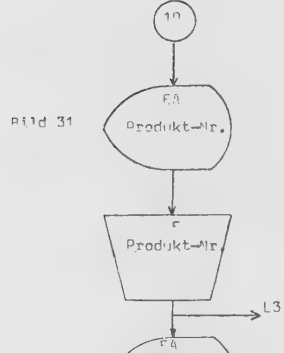
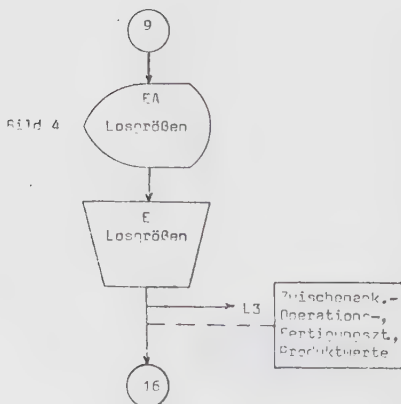
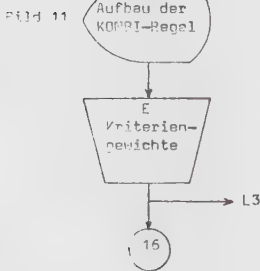
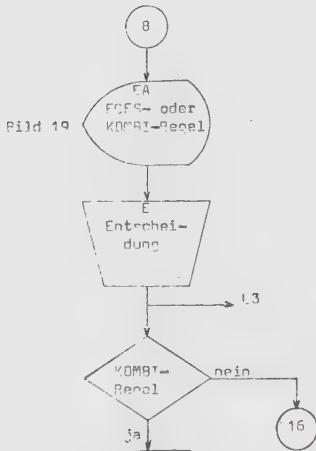
5.3.2.1. Dialog-Eingabeteil

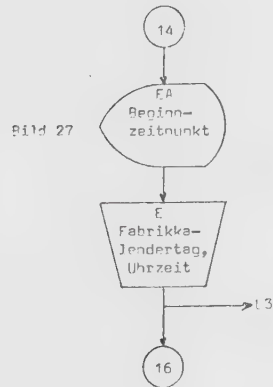
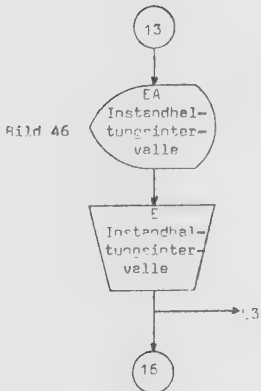
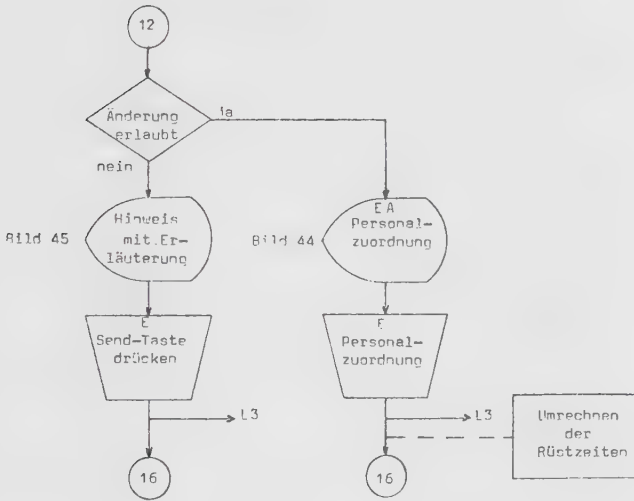












5.3.2.2. Dialog=Ausgabeteil

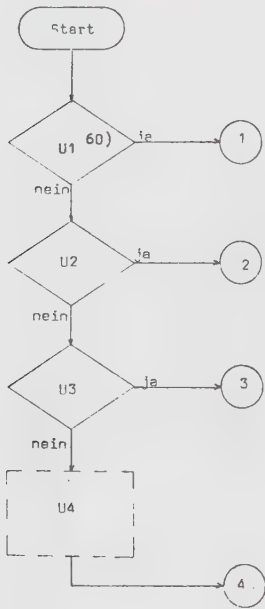


Bild 29

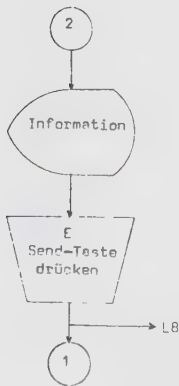


Bild 24

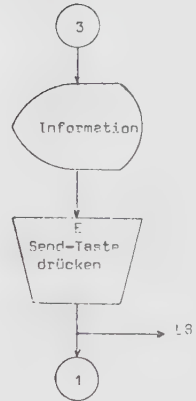
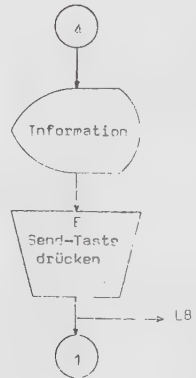


Bild 30



60) vgl. zu den Ursachen für Unterbrechungen Abschnitt 4.3.2.

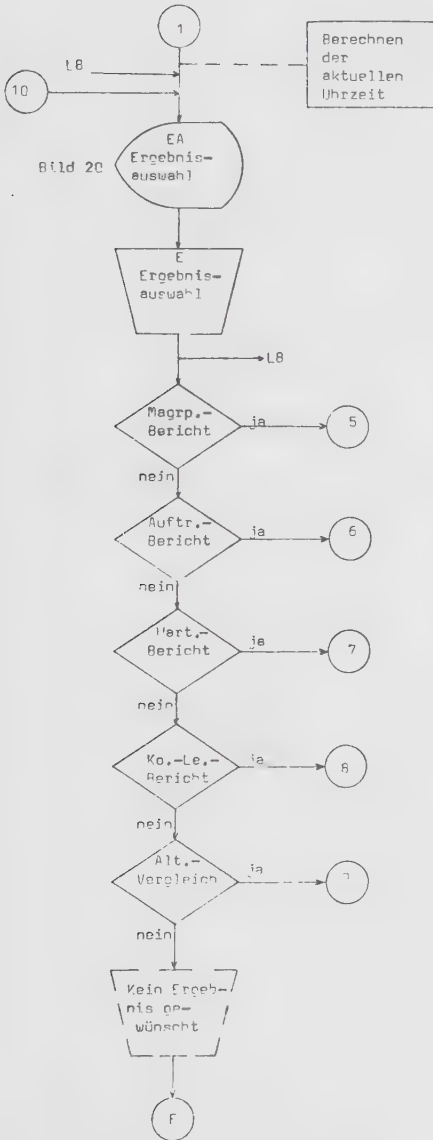


Bild 21

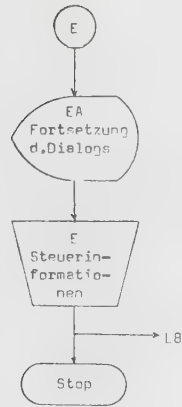


Bild 25

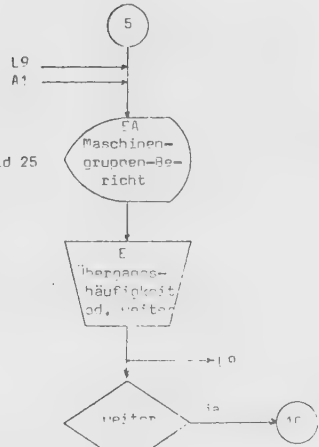
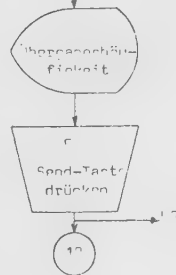
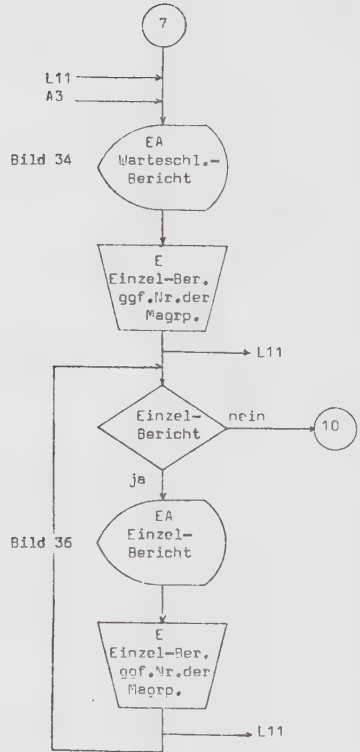
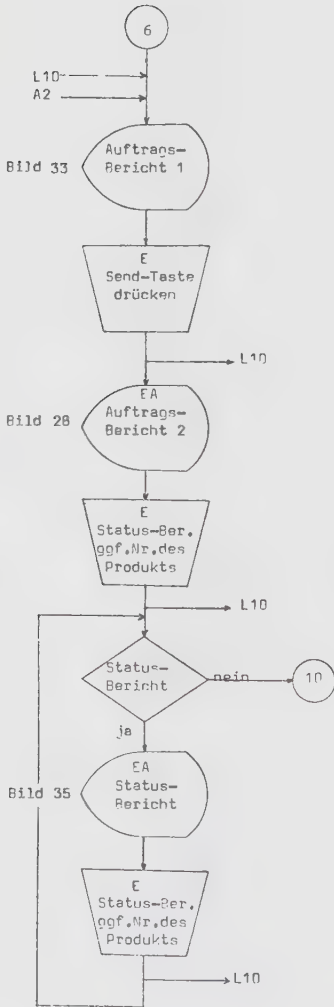
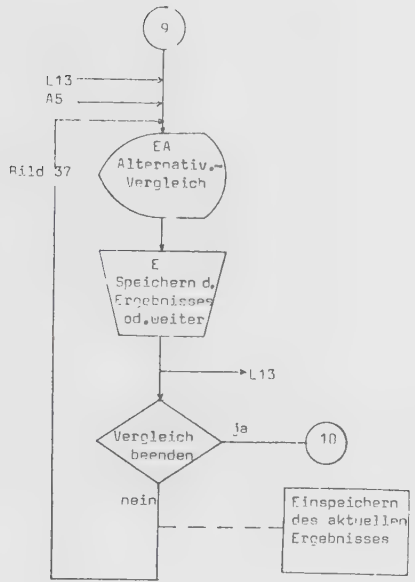
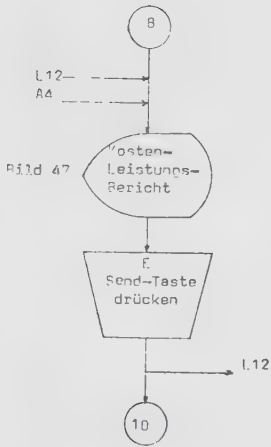


Bild 49







5.4. Ein beispielhafter Dialogablauf

Die Darstellung aller im Rahmen des Dialogs angebotenen Verzweigungen und deren Kombinationen ist im Rahmen dieser Arbeit unmöglich. Deshalb soll im folgenden lediglich ein Beispiel eines Dialogs aufgezeigt werden, das sich mit dem kombinierten Einsatz von Maschinenkapazitäten, Instandhaltungsstrategien und Prioritätsregeln unter knappen Zwischenlagerrestriktionen befaßt.

Der Beschreibung liegt folgende Symbolik zugrunde:

Von den beiden durch Schrägstriche getrennten Bildnummern bedeutet die erste die sich aus dem Beispiel ergebende Abfolge von Bildmasken, die zweite die in den Flußdiagrammen und im Programm verwendeten Bildnummern. Gleiche Masken, die sich im Dialog wiederholen, werden nur im Text erwähnt und nicht mehr gesondert abgebildet. Die Bezeichnung "o.D." ("ohne Darstellung") bedeutet, daß die betreffenden Textinhalte nicht an dieser Stelle, sondern weiter vorn zu suchen sind.

Dialogablauf:

Bild 1/6:

Diese Maske erscheint zu Beginn einer Dialogsitzung und dient als allgemeine Einführung.

Eingabe: SEND

```

1/6
*****
* ICH BEGRÜESSE SIE ZUM DIALOG MIT DEM *
*-----*
*           WERKSTATTSIMULATOR           *
*-----*
* DAS PROGRAMM STELLT IHNEN MODELLE ZUR *
* VERFÜGUNG, ANHAND DERER SIE ABLAUFE *
* IN EINER WERKSTATT DURCHSPIELEN KOENNEN. *
* *
* SIE WERDEN IM VORLIEGENDEN PROGRAMM EINIGE *
* ARBEITSSTUNDEN IN EINER WERKSTATT SIMULIEREN *
* UND BELIBIG OFT WIEDERHOLEN KOENNEN. *
* DIE BEGINNZEIT DÜRFEN SIE AUF DER *
* SIMULATIONSUHR SELBST EINSTELLEN. *
* IN VON IHNEN GEWAELHTEN ZEITINTER- *
* VÄLLEN ERHALTEN SIE EINEN ERGEBNIS- *
* BERICHT, SO DASS SIE RECHTZÄITIG *
* DIE REAKTION DES MODELLS AUF IHRE *
* EINGABEN ÜBERPRÜEFEN KOENNEN. *
* BITTE SEND *
*****

```

Bild 2/10:

In diesem Dialogstadium kann der Benutzer zwischen den fünf verschiedenen Stammdaten auswählen und diese dem folgenden Dialog zugrunde legen.

Eingabe: 2222

```

2/10
*****
* EINE STA-MDATEI MIT UNTERSCHIEDLICHEN *
* FERTIGUNGS- BZW. BETRIEBSMITTELSTAMM- *
* DATEN IST BEREITS FÜR SIE ANGELEGT. *
* *
* BITTE WÄHLEN SIE AUS FOLGENDEN *
* STAMMDATEN-NUMMERN AUS: *
* *
* NR.      1111 *
* NR.      2222 *
* NR.      3333 *
* NR.      4444 *
* NR.      5555 *
* *
* *
* *
* *
* IHRE EINGABE UND SEND. *
*****

```

Bild 3/13:

In der ersten Entscheidungsebene kann der Anwender verschiedene Möglichkeiten der Parameterveränderung anwählen.

Da alle Werte bereits durch Systemparameter beim Laden festgelegt werden, erübrigen sich zunächst zeitraubende Eingaben.

Notwendig ist allenfalls die nochmalige Überprüfung bestimmter Eingabewerte. Im folgenden werden die Soll-Durchlaufzeiten einer näheren Betrachtung unterzogen.

Eingabe: 6

```

3/13
*****
* ENTSCHEIDUNGSEBENE 1 *
*=====*
* BITTE ENTSCHEIDEN SIE SICH, OB SIE DIE WERTE *
* *
* (1) AUFTRAGSVERTEILUNG *
* (2) ANZAHL INSTALLIERTER MASCHINEN *
* (3) PERSONALBESTAND *
* (4) ANORDNUNG VON MASCHINENGRUPPEN *
* (5) KAPAZITÄT DER ZWISCHENLAGER *
* (6) SOLL-DURCHLAUFZEITEN (TERMINFIXIERUNG) *
* *
* VERÄNDERN WOLLEN ODER *
* *
* (7) DEREN BISHERIGE EINSTELLUNG *
* BEIHALTEN WOLLEN. *
* *
* *
* DANN BITTE SEND *
*****

```


Bild 8/19:

Der im folgenden geplante Simulationslauf soll zunächst mit der FCFS-Regel ablaufen. Deshalb bleibt die gegenwärtige Parametereinstellung bestehen.

Eingabe: LET

Bild 9/15 (o.D.):

Nach jeder Wahl bzw. Betrachtung von Einzelwerten springt das Programm zur ursprünglich gewählten Entscheidungsebene zurück.

Die Parameterwahl bzw. -betrachtung ist abgeschlossen, und der Simulationslauf soll beginnen. Dabei geht der Benutzer folgendermaßen vor:

Zunächst Eingabe: 9

Bild 10/48:

Vor dem eigentlichen Start des Simulationslaufes benötigt das Programm noch einige Informationen.

Eingabe: 1

8/19

*ALS PRIORITAETSREGELN STEHEN ZUR VERFUEGUNG#

- * (1) FCFS-REGEL (FIRST-COME-FIRST-SERVED)
- * (2) KOMBINIERTE DYNAMISCHE PRIORITAETSREGEL

*BISHERIGE REGEL# 1

*IHRE EINGABE UND SEND

10/48

*WUENSCHEN SIE

- * (1) EINEN NEUBEGINN DER SIMULATION VON NULLZUSTAND AUS ODER
- * (2) EINE FORTSETZUNG DER SIMULATION, AUSGEHEND VOM AKTUELLEN ZUSTAND IN DER WERKSTATT...

*IHRE EINGABE UND SEND

11/38

*BITTE GEBEN SIE DAS GEWUENSCHTE ZEITINTERVALL AN, NACH DEM SIE DAS NAECHSTE ZWISCHENBEREICH WUENSCHEN...

*BISHERIGER WERT# 0.00

*BITTE IHRE EINGABE IN STUNDEN UND MINUTEN DURCH EINEN PUNKT GETRENNT...

Bild 11/38:

Der Benutzer kann das Zeitintervall, nach dem der Simulationslauf unterbrochen werden soll, selbst bestimmen.

Eingabe: 3 Stunden

Bild 16/20 (o.D.):

Rückkehr zum Auswahlbild.

Die Betrachtung weiterer Simulationsergebnisse ist nicht mehr erwünscht.

Eingabe: 6

Bild 17/21:

Der Benutzer bekommt am Ende der Ergebnisbetrachtung eine Palette von Auswahlfragen vorgelegt, die den Fortgang des Dialogs betreffen.

Eingabe: 1

Bild 18/48 (o.D.):

Wahlmöglichkeit zwischen Neubeginn und Fortsetzung der Simulation.

Der Anwender möchte die Simulation fortsetzen.

Eingabe: 2

Bild 19/38 (o.D.):

Festsetzung des Unterbrechungsintervalles.

Eingabe: 3 Stunden

Bild 20/24:

Diese Maske signalisiert eine außergewöhnliche Simulationsunterbrechung.

Eingabe: SEND

Bild 21/20 (o.D.):

Ergebnisauswahl.

Eingabe: 3

Bild 22/34:

Bereits 52 Minuten nach der letzten planmäßigen Unterbrechung (in Einheiten der Simulationszeit gerechnet) stellt sich heraus, daß Aufträge, die sich vor der Maschinengruppe 3 stauen, nicht

```

17/21
*****
*
* WIE SOLL ES WEITERGEHEN...
*
* (1) KEINE PARAMETERÄNDERUNG
*   ERGÄNZT
* (2) ENTSCHEIDUNGSEBENE 2
*   (DISPOSITIONSENTSCHEIDUNGEN)
* (3) ENTSCHEIDUNGSEBENE 1
*   (PLANUNGSENTSCHEIDUNGEN)
* (4) SIMULATION MIT ÄNDERLICH STAMMDATEN
*   (ANDERE WERKSTATTBEZIEHUNGEN)
* (5) ENDE DER DIALOGSITZUNG
*
*
*
*
*
*
* IHRE ENTSCHEIDUNG UND SEND
*****

```

```

20/24
*****
*
* VOR EINIGEN MASCHINENGRUPPEN BILDEN SICH
* SO LANGE WARTESCHLANGEN, DASS DIE RESER-
* VIERTEN PUFFERLAGER NICHT AUSREICHEN.
*
* BITTE INFORMIEREN SIE SICH GENAU ÜBER
* DIE WARTESCHLANGENSITUATION AN DEN EINZELNEN
* MASCHINENGRUPPEN.
*
*
*
*
*
*
* IN DEN FOLGENDEN BILDERN SEHEN SIE DAS
* BISHER ERZIELTE ERGEBNIS BIS ZUM ABBRUCH
* DER SIMULATION.
*
* BITTE SEND
*****

```

```

22/34
*****
*                                     DATUM UHRZEIT
* WARTESCHLANGE 1-BERICHT              J      3.53
* =====
*           MAXIMALE BELEGUNG (KAPAZITÄT) HOECHST-
*           BELEGUNG AKTUELL           GRENZE
* =====
* VOR MAGRP 1:      13           1      4180      30
* VOR MAGRP 2:      19           17     78413      30
* VOR MAGRP 3:      30           31    132700      30
* VOR MAGRP 4:       1           0       0       30
* VOR MAGRP 5:      25           24    123940      30
* VOR MAGRP 6:       3           0       0       30
* VOR MAGRP 7:       6           0       0       30
* VOR MAGRP 8:       7           0       0       30
* VOR MAGRP 9:       4           0       0       30
* =====
* SUMME             --           73    339210      --
* =====
* EINGABE (1)-(3): EINZELERGEBNISSE MA-GRP 1-9
* EINGABE (10): WEITER IM PROGRAMM
*****

```

(Fortsetzung Bild 22/34)

mehr im Zwischenlager unterzubringen sind. Dies ist leicht daran zu erkennen, daß an dieser Stelle die Höchstgrenze lagerfähiger Aufträge bereits um 1 überschritten wurde. Dieser Tatbestand führte zum Simulationsabbruch.

Im folgenden soll der Grund für die ungleichmäßige Entwicklung der Warteschlangen gesucht werden.

Zur besseren Handhabung des Dialogs bedient man sich ab sofort der Kommandosteuerung.

Eingabe: E2

Bild 23/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Der Benutzer möchte den Maschineneinsatz überprüfen.

Eingabe: 5

Bild 24/26:

Bisher waren von allen Maschinengruppen gleich viele Einzelmaschinen im Einsatz.

Im folgenden sollen die Betriebsmittelkapazitäten besser aufeinander abgestimmt werden. Dabei ist davon auszugehen, daß kurzfristig weder neue Maschinen installiert noch neue Zwischenlagerplätze geschaffen werden können.

Eingabe: 2,5,5,2,5,2,2,1,1

Bild 25/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Eingabe: S1

Bild 26/34:

Bei Anwendung der Kommandosteuerung (zu vor Eingabe des S1-Befehls) präsentiert das Programm automatisch das zuletzt vom Benutzer angewählte Ergebnisbild.

Ohne Parameteränderung soll die Simulation fortgesetzt werden.

Eingabe: S2

Bild 27/34:

Die Warteschlangen zeigen einen deutlich gleichmäßigeren Verlauf als bisher. Jedoch weist insbesondere die Maschinengruppe 5 immer noch eine relativ hohe Belastung auf, die es abzubauen gilt.

Eingabe E2

Bild 28/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Der Benutzer möchte die Prioritätsregel verändern.

Eingabe: 2

24/26

*SIE MÖCHTEN DIE ANZAHL DER IM EINSATZ
*BEFINDLICHEN MASCHINEN VERÄNDERN.

	BISHER IM EINSATZ	(VORHANDEN)
* MA-GRP 1:	5	5
* MA-GRP 2:	5	5
* MA-GRP 3:	5	5
* MA-GRP 4:	5	5
* MA-GRP 5:	5	5
* MA-GRP 6:	5	5
* MA-GRP 7:	5	5
* MA-GRP 8:	5	5
* MA-GRP 9:	5	5

*MINDESTANZAHL: 1 MASCHINE JE GRUPPE.
*BITTE IHRE EINGABE UND SEND

26/34

		DATE	UHRZEIT
*WARTESCHLANGEN-BERICHT		0	3.00
	MAXIMALE BELEGUNG (KAPAZITÄT)	HOCHST-	
	BELEGUNG AKTUELL	GRENZE	
*VOR MAGRP 1:	13	8	33180
*VOR MAGRP 2:	13	10	46800
*VOR MAGRP 3:	9	9	35790
*VOR MAGRP 4:	1	0	0
*VOR MAGRP 5:	21	18	92530
*VOR MAGRP 6:	2	1	3300
*VOR MAGRP 7:	12	11	45900
*VOR MAGRP 8:	7	2	9770
*VOR MAGRP 9:	4	4	24000
*SUMME	1	53	235270
*EINGABE (1)-(3): EINZELERGEBNISSE MA-GRP 1-9			
*EINGABE (10): WEITER IM PROGRAMM			

27/34

		DATE	UHRZEIT
*WARTESCHLANGEN-BERICHT		0	6.01
	MAXIMALE BELEGUNG (KAPAZITÄT)	HOCHST-	
	BELEGUNG AKTUELL	GRENZE	
*VOR MAGRP 1:	18	18	85980
*VOR MAGRP 2:	14	9	39790
*VOR MAGRP 3:	10	4	17270
*VOR MAGRP 4:	6	5	24600
*VOR MAGRP 5:	26	25	115670
*VOR MAGRP 6:	7	6	22390
*VOR MAGRP 7:	14	11	49800
*VOR MAGRP 8:	7	4	19600
*VOR MAGRP 9:	4	2	9600
*SUMME	1	54	383770
*EINGABE (1)-(3): EINZELERGEBNISSE MA-GRP 1-9			
*EINGABE (10): WEITER IM PROGRAMM			

Bild 29/19 (o.D.):

Wahl zwischen FCFS- und KOMBI-Regel.

Die Wahl fällt auf die kombinierte dynamische Prioritätsregel.

Eingabe: 2

Bild 30/11:

Bisher fand keines der abgebildeten Prioritätskriterien für die Simulation Anwendung.

Zum Ausgleich von Warteschlangen bietet sich die KMR-Regel an. Ihre Wahl erfolgt in der Weise, daß für das 8. Element des Eingabevektors eine positive Zahl gesetzt wird, da Aufträge mit den kürzesten Warteschlangen an der jeweiligen Folgemaschine bevorzugt werden sollen.

Eingabe: 0,0,0,0,0,0,0,1,0

Bild 31/15 (o.D.):

Entscheidungsstufe 2.

Eingabe: S1

Bild 32/34:

Bereits nach 3 Simulationsstunden wird die ausgleichende Wirkung der KMR-Regel deutlich.

Der Engpaß an der 5. Maschinengruppe besteht nach wie vor. Deshalb soll der Maschinengruppen-Bericht angewählt werden.

Eingabe: A1

Bild 33/25:

Diese Darstellung zeigt andeutungsweise die Störanfälligkeit der 5. Maschinengruppe.

Es soll geprüft werden, ob dieser Trend im weiteren Simulationsablauf anhält.

Eingabe: S2

30/11

```
*****
* IN DER VORLIEGENDEN KOMBINIERTEN DYNAMISCHEN
* PRIORITAETSREGEL SIND 9 VERSCHIEDENE
* PRIORITAETSKRITERIEN ADDITIV VERKUEPFT,
* WOBEI SICH JEDES KRITERIUM MIT EINEM GEWICHT
* VORSEHEN KOECHEN. DURCH POSITIVES VORZEICHEN
* KOENNEN SIE DIE NIEDRIGEN, DURCH NEGATIVES
* DIE HOEHEREN WERTE DER KRITERIEN BEVORZUGEN.
* BISHER WURDEN FOLGENDE WERTE EINGEGEBEN:
* 1 ANKUNFTSZEIT IN DER WERKSTATT 0
* 2 OPERATIONSZEITEN 0
* 3 FERTIGUNGSZEITEN 0
* 4 RESTFERTIGUNGSZEITEN 0
* 5 UMRUESTZEITEN 0
* 6 SCHLUPFZEITEN 0
* 7 PRODUKTWERTE 0
* 8 WARTESCHLANGENLAENGE FOLGEMASCHINE 0
* 9 EXTERNE PRIORITAETEN 0
* EINGABE: 1 GANZZAHLIG ZWISCHEN +9 UND -9,
* MINDESTENS EIN WERT #0
*****
```

32/34

```
*****
* WARTESCHLANGEN-BERICHT DATUM UHRZEIT
* 0 3.00
*
* MAXIMALE BELEGUNG (KAPAZITAET) HOECHST-
* BELEGUNG AKTUELL GRENZE
*
* VOR MAGRP 1 13 7 37860 30
* VOR MAGRP 2 13 8 32340 30
* VOR MAGRP 3 9 5 18600 30
* VOR MAGRP 4 6 6 22910 30
* VOR MAGRP 5 22 20 10524 30
* VOR MAGRP 6 3 1 370 30
* VOR MAGRP 7 11 8 37900 30
* VOR MAGRP 8 7 5 24170 30
* VOR MAGRP 9 3 3 18000 30
*
* SUMME 1 -- 53 302790 ---
*
* EINGABE (1)-(9) : EINZELERGEBNISSE MAGRP 1-9
* EINGABE (10) : WEITER IM PROGRAMM
*****
```

33/25

```
*****
* MASCHINENGRUPPEN-BERICHT DATUM UHRZEIT
* 2 3.00
*
* ABLEED UMRUEDE PLANT ZUFAHS KAPAS
* LEERTZ LEERTZ LEERTZ LEERTZ LASTGX
*
* MAGRP 1 0.00 0.02 0.00 0.00 98
* MAGRP 2 0.00 0.05 0.00 0.00 97
* MAGRP 3 0.00 0.14 0.00 0.00 92
* MAGRP 4 0.12 0.00 0.00 0.00 91
* MAGRP 5 0.00 0.02 0.00 1.00 65
* MAGRP 6 0.00 0.00 0.00 0.00 99
* MAGRP 7 0.00 0.01 0.00 0.00 99
* MAGRP 8 0.00 0.01 0.00 0.00 99
* MAGRP 9 0.00 0.00 0.00 0.00 99
*
* MITTELW 0.01 0.03 0.00 0.05 93
*
* EINGABE (1) : WEITER IM PROGRAMM
* EINGABE (2) : UEBERGANGSSCHLUPFZEIT
*****
```

Bild 34/25:

Die Vermutung hat sich bestätigt:

Die 5. Maschinengruppe ist besonders störanfällig und eine Überprüfung der Instandhaltungsintervalle liegt nahe.

Eingabe: E2

Bild 35/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Eingabe: 7

```

34/25
*****
*                               DATUM UHRZEIT
* MASCHINENGRUPPEN-BERICHT      0      6.00
* *****
*          ABL3ED UMR3ED PLIN3T ZUFA3S KAPAUS
*          L3ER3T L3ER3T L3ER3T L3ER3T L3STG%
* *****
* MAGRP 1:      .00      .05      .00      .00      98
* MAGRP 2:      .00      .10      .00      .00      95
* MAGRP 3:      .00      .05      .00      .00      92
* MAGRP 4:      .12      .03      .00      .00      95
* MAGRP 5:      .00      .03      .00      2.00      65
* MAGRP 6:      .00      .02      .00      .00      99
* MAGRP 7:      .00      .04      .00      .00      98
* MAGRP 8:      .00      .02      .00      .00      99
* MAGRP 9:      .00      .01      .00      .00      99
* *****
* MITTELW:      .01      .07      .00      .13      93
* *****
* EINGABE (1): WEITER IM PROGRAMM
* EINGABE (2): JEDERGANGSHAUEFIGKEIT
*****

```

Bild 36/46:

Damit stellt sich heraus, daß die ursprünglich gesetzten Parameter keine planmäßigen Instandhaltungsaktionen vorsehen. (Dies ist dadurch zu erreichen, daß man bei der Systemgenerierung extrem hohe Werte als Instandhaltungsintervalle einsetzt.)

Eingabe: 1000,1000,1000,1000,
4,1000,1000,1000,1000

Bild 37/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Eingabe: S1

```

36/46
*****
* BISHIR BETRUGEN DIE INSTANDHALTUNGSINTER-
* VALLE FUER DIE EINZELNEN MASCHINENGRUPPEN:
* *****
*          MAGRP 1: 1000.00
*          MAGRP 2: 1000.00
*          MAGRP 3: 1000.00
*          MAGRP 4: 1000.00
*          MAGRP 5: 1000.00
*          MAGRP 6: 1000.00
*          MAGRP 7: 1000.00
*          MAGRP 8: 1000.00
*          MAGRP 9: 1000.00
* *****
* BITTE IHRE EINGABE IN STUNDEN UND MINUTEN
* DURCH EINEN PUNKT GETRENNT...
*****

```

Bild 38/25:

Gegenüber der Alternative ohne Instandhaltung ergab sich keine Veränderung.

Trotzdem soll die Simulation weiterhin beobachtet werden.

Eingabe: S2

```

38/25
*****
*                               DATUM UHRZEIT
* MASCHINENGRUPPEN-BERICHT      0      3.00
* *****
*          ABL3ED UMR3ED PLIN3T ZUFA3S KAPAUS
*          L3ER3T L3ER3T L3ER3T L3ER3T L3STG%
* *****
* MAGRP 1:      .00      .02      .00      .00      98
* MAGRP 2:      .00      .05      .00      .00      97
* MAGRP 3:      .00      .14      .00      .00      92
* MAGRP 4:      .12      .00      .00      .00      91
* MAGRP 5:      .00      .02      .00      1.00      65
* MAGRP 6:      .00      .00      .00      .00      99
* MAGRP 7:      .00      .01      .00      .00      99
* MAGRP 8:      .00      .01      .00      .00      99
* MAGRP 9:      .00      .00      .00      .00      99
* *****
* MITTELW:      .01      .03      .00      .05      93
* *****
* EINGABE (1): WEITER IM PROGRAMM
* EINGABE (2): JEDERGANGSHAUEFIGKEIT
*****

```

Bild 39/25:

Die planmäßige Instandhaltungsaktion nach 4 Stunden Lastlaufzeit konnte die in der Zwischenzeit auftretenden Zufallsausfälle nicht verhindern.

Im folgenden soll der Warteschlangen-Bericht nochmals einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

Eingabe: A3

39/25

***** DATUM UHRZEIT *****					
* MASCHINENGRUPPEN-BERICHT 0 6.00 *					

* ABLSD UMRBLD PLINST ZUFAUS KAPAS *					
* LERZT LERZT LERZT LERZT LASTGZ *					

* MAGRP 1:	.00	.05	.00	.00	98
* MAGRP 2:	.00	.10	.00	.00	95
* MAGRP 3:	.00	.25	.00	.00	92
* MAGRP 4:	.12	.03	.00	.00	95
* MAGRP 5:	.00	.05	1.00	2.00	48
* MAGRP 6:	.00	.02	.00	.00	99
* MAGRP 7:	.00	.04	.00	.00	98
* MAGRP 8:	.00	.02	.00	.00	99
* MAGRP 9:	.00	.01	.00	.00	99

* MITTELW:	.01	.07	.05	.13	91

* EINGABE (1): WEITER IM PROGRAMM					
* EINGABE (2): UEBERGANGSHALFUGKEIT					

Bild 40/34:

Auch der Engpaß ist noch deutlich sichtbar.

Der Benutzer interessiert sich trotzdem für die Wirkungsweise seiner Instandhaltungsentscheidung im weiteren Simulationsablauf.

Eingabe: S2

40/34

***** DATUM UHRZEIT *****					
* WARTESCHLANGEN-BERICHT 0 6.00 *					

* MAXIMALE BELEGUNG (KAP1-10) HOECHST- *					
* BELEGUNG AKTUELL GRENZE *					

* VOR MAGRP 1:	13	7	41000	30	
* VOR MAGRP 2:	13	9	37300	30	
* VOR MAGRP 3:	9	8	33200	40	
* VOR MAGRP 4:	10	9	39100	30	
* VOR MAGRP 5:	23	22	99200	30	
* VOR MAGRP 6:	7	6	22200	30	
* VOR MAGRP 7:	11	7	34200	30	
* VOR MAGRP 8:	10	8	37600	30	
* VOR MAGRP 9:	7	6	30300	30	

* SUMME	1	--	82 37300	---	

* EINGABE (1) - (3): EINZELERGEBNISSE MA-GRP 1-9					
* EINGABE (10): WEITER IM PROGRAMM					

Bild 41/34:

Langfristig scheinen sich planmäßige Instandhaltungsaktionen zu "lohlen", wie das nebenstehende Bild deutlich zeigt.

Der Benutzer schaltet nochmals zum Maschinengruppen-Bericht um.

Eingabe: A1

41/34

***** DATUM UHRZEIT *****					
* WARTESCHLANGEN-BERICHT 0 9.00 *					

* MAXIMALE BELEGUNG (KAP1-10) HOECHST- *					
* BELEGUNG AKTUELL GRENZE *					

* VOR MAGRP 1:	13	10	57120	30	
* VOR MAGRP 2:	15	14	62200	30	
* VOR MAGRP 3:	13	11	56510	30	
* VOR MAGRP 4:	14	14	67570	30	
* VOR MAGRP 5:	28	12	46960	30	
* VOR MAGRP 6:	13	11	44200	30	
* VOR MAGRP 7:	12	12	57120	30	
* VOR MAGRP 8:	10	8	39700	30	
* VOR MAGRP 9:	12	12	55510	30	

* SUMME	1	--	104 48080	---	

* EINGABE (1) - (9): EINZELERGEBNISSE MA-GRP 1-9					
* EINGABE (10): WEITER IM PROGRAMM					

Bild 42/25:

In der Zwischenzeit sind keine zusätzlichen Zufallsausfälle an der 5. Maschinengruppe mehr aufgetreten, und ihre Kapazitätsauslastung hat sich gebessert, was einen schnelleren Abbau der Warteschlangen zur Folge hatte.

Der Benutzer wendet sich nun den bisher abgeschlossenen Aufträgen zu.

Eingabe: A2

42/25

```
*****
*                                     DATUM UHRZEIT *
* MASCHINENGRUPPEN-BERICHT          0  9.00 *
*-----*
*          ANZAHL  UMRDND  PLINST  ZUFAHS  KAPAU *
*          UMRZT  LMRZT  LMRZT  LMRZT  LASTGX *
*-----*
* MAGRP 1:  .00      .03      .00      .00  98  *
* MAGRP 2:  .00      .20      .00      .00  95  *
* MAGRP 3:  .00      .41      .00      .00  92  *
* MAGRP 4:  .12      .04      .00      .00  96  *
* MAGRP 5:  .00      .15      1.00      2.00  63  *
* MAGRP 6:  .00      .05      .00      .00  98  *
* MAGRP 7:  .00      .06      .00      .00  98  *
* MAGRP 8:  .00      .03      .00      .00  99  *
* MAGRP 9:  .00      .02      .00      .00  99  *
*-----*
* MITTELW:  .01      .12      .06      .13  93  *
*-----*
* EINGABE (1): WEITER IM PROGRAMM
* EINGABE (2): UEBERGANGSHAUFZUGKEIT
*****
```

Bild 43/33:

Die Abfertigungsrate der Aufträge ist zu gering und soll im weiteren Verlauf beschleunigt werden.

Zunächst ist der Simulationsumfang auf 12 Stunden auszuweiten.

Eingabe: S2

43/33

```
*****
*                                     DATUM UHRZEIT *
* AUFTRAGS-BERICHT 1                0  9.00 *
*-----*
*          ANZAHL  AUFTRG  MITTEL  ANZAHL  MITTEL *
*          AUFTRG  WERT    DLFG  VERSPG  VERSPG *
*-----*
* PROD 1:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 2:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 3:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 4:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 5:  1      3300    5.28      0      .00 *
* PROD 6:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 7:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 8:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 9:  0        0      .00      0      .00 *
*-----*
* GESAMT:  1      3300    5.28      0      .00 *
*-----*
* BITTE SEND
*****
```

Bild 44/33:

Dieses Ergebnis will der Benutzer im Alternativen-Vergleich festhalten.

Eingabe: A5

44/33

```
*****
*                                     DATUM UHRZEIT *
* AUFTRAGS-BERICHT 1                0 12.01 *
*-----*
*          ANZAHL  AUFTRG  MITTEL  ANZAHL  MITTEL *
*          AUFTRG  WERT    DLFG  VERSPG  VERSPG *
*-----*
* PROD 1:  1      4350    10.29      0      .00 *
* PROD 2:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 3:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 4:  1      3770    10.51      0      .00 *
* PROD 5:  3      3300    9.02      2      2.00 *
* PROD 6:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 7:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 8:  0        0      .00      0      .00 *
* PROD 9:  0        0      .00      0      .00 *
*-----*
* GESAMT:  5     18620    9.41      2      1.12 *
*-----*
* BITTE SEND
*****
```


Bild 53/20 (o.D.):

Ergebnisauswahl.

Eingabe: 5

Bild 54/37 (o.D.):

Der Alternativen-Vergleich enthält bisher erst eine Zeile. Die neuen Ergebnisse sollen in der 2. Zeile erscheinen.

Eingabe: 2

Bild 55/37:

Die Prioritätsregel war offensichtlich ungünstig gewählt.

Eingabe: E2

Bild 56/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Eingabe: 2

Bild 57/19 (o.D.):

Wahl der KOMBI-Regel.

Eingabe: 2

Bild 58/11:

Im Rahmen der KMR-Regel soll das Kriterium der kürzesten Umrüstzeiten durch das der kürzesten Operationszeiten ersetzt werden.

Eingabe: 0,1,0,0,0,0,1,0

Bild 59/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Eingabe: S1

Bild 60/37 (o.D.):

Eintrag der neuesten Ergebnisse in die 3. Zeile.

Eingabe: 3

Bild 61/37:

Auch diese Prioritätsregel bietet wenig Vorteile.

Eingabe: E2

Bild 62/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Eingabe: 2

55/37

*ALTERNATIVEN-VERGLEICH					
			DATUM	UHRZEIT	
			J	12.00	

KAPAZ	AUFRG	MITTEL	ANZAHL	AUFRG	KOSTEN
LAST%	BEEND	DLFZ	VERSPG	WERT	

93	5	9.41	2	18620	166944
92	0	.00	0	0	166838
0	0	.00	0	0	0
0	0	.00	0	0	0
0	0	.00	0	0	0
0	0	.00	0	0	0
0	0	.00	0	0	0

92	5	9.41	2	18620	166891

*EINGABE (0) 1 LOESCHEN ALLER WERTE					
*EINGABE (1)-(7) 1 DEFINITION DES AKTUELLEN					
STANDES ALS ALTERNATIVE 1-7					
*EINGABE (8) 1 WEITER IM PROGRAMM					

58/11

*IN DER VORLIEGENDEN KOMBINIERTEN DYNAMISCHEN					
*PRIORITAETSREGEL SIND 9 VERSCHIEDENE					
*PRIORITAETSKRITERIEN AKTIV VERKNEUFT,					
*WOBEI SIE JEDES KRITERIUM MIT EINEM GEWICHT					
*VERSEHEN KOENNEN, DURCH POSITIVES VORZEICHEN					
*KOENNEN SIE DIE NIEDRIGEN, DURCH NEGATIVES					
*DIE HOEHEREN WERTE DER KRITERIEN BEVORZUGEN.					
*BISHER WURDEN FOLGENDE WERTE EINGEGEBEN:					GEW
*1	ANKUNFTSZEIT IN DER WERKSTATT				0
*2	OPERATIONSZEITEN				0
*3	FERTIGUNGSZEITEN				0
*4	RESTFERTIGUNGSZEITEN				0
*5	UMRUESTZEITEN				1
*6	SCHLUPFZEITEN				0
*7	PRODUKTWERTE				0
*8	WARTESCHLANGENLAENGL FOLGEMASCHINE				1
*9	EXTERNE PRIORITAETEN				0
*EINGABE 1 SANZZAHLIG ZWISCHEN +9 UND -3,					
MINDESTENS EIN WERT #0					

61/37

*ALTERNATIVEN-VERGLEICH					
			DATUM	UHRZEIT	
			0	12.00	

KAPAZ	AUFRG	MITTEL	ANZAHL	AUFRG	KOSTEN
LAST%	BEEND	DLFZ	VERSPG	WERT	

93	5	9.41	2	18620	166944
92	0	.00	0	0	166838
92	4	10.16	4	21300	166789
0	0	.00	0	0	0
0	0	.00	0	0	0
0	0	.00	0	0	0
0	0	.00	0	0	0

92	4	9.59	3	19900	166057

*EINGABE (0) 1 LOESCHEN ALLER WERTE					
*EINGABE (1)-(7) 1 DEFINITION DES AKTUELLEN					
STANDES ALS ALTERNATIVE 1-7					
*EINGABE (8) 1 WEITER IM PROGRAMM					

Bild 63/19 (o.D.):

Wahl der KOMBI-Regel.

Eingabe: 2

Bild 64/11:

Einführung des Kriteriums der kürzesten Restfertigungszeiten in die KMR-Regel.

Eingabe: 0,0,0,1,0,0,0,1,0

Bild 65/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Eingabe: S1

Bild 66/37 (o.D.):

Ausgabe der neuesten Ergebnisse in der 4. Zeile des Alternativen-Vergleichs.

Eingabe: 4

Bild 67/37:

Eine deutliche Verbesserung ist bei der Anzahl der abgeschlossenen Aufträge zu erkennen.

Eingabe: E2

Bild 68/15 (o.D.):

Entscheidungsebene 2.

Eingabe: 2

Bild 69/19 (o.D.):

Wahl der KOMBI-Regel.

Eingabe: 2

Bild 70/11:

Im folgenden Versuch sollen

- (a) das Kriterium der kürzesten Restfertigungszeiten stärker gewichtet und gleichzeitig
- (b) das Kriterium der höchsten Produktwerte mit in die Formel eingebracht werden.

Eingabe: 0,0,0,2,0,0,-1,1,0

64/11

```
*****
*
* IN DER VORLIEGENDEN KOMBINIERTEN DYNAMISCHEN
* PRIORITAETSREGEL SIND 9 VERSCHIEDENE
* PRIORITAETSKRITERIEN ADDITIV VERKNUEPFT,
* WOBEI SIE JEDES KRITERIUM MIT EINEM GEWICHT
* VERSEHEN KOENNEN. DURCH POSITIVES VORZEICHEN
* KOENNEN SIE DIE NIEDRIGEN, DURCH NEGATIVES
* DIE HOEHEREN WERTE DER KRITERIEN BEVORZUGEN.
* BISHER WURDEN FOLGENDE WERTE EINGEGEBEN:      GEM
* 1 ANKUNFTSZEIT IN DER WERKSTATT                0
* 2 OPERATIONSZEITEN                             1
* 3 FERTIGUNGSZEITEN                             0
* 4 RESTFERTIGUNGSZEITEN                         0
* 5 UMRUESTZEITEN                                0
* 6 SCHLUPFZEITEN                                0
* 7 PRODUKTWERTE                                  0
* 8 WARTESCHLINGENLAENGE FOLGEMASCHINE           1
* 9 EXTERNE PRIORITAETEN                          0
* EINGABE: GANZZAHLIG ZWISCHEN +9 UND -9,
*          MINDESTENS EIN WERT #0
*****
```

67/37

```
*****
*
* ALTERNATIVEN-VERGLEICH      DATUM UHRZEIT
*                               J      12.01
*
* KAPAZI  AUFTRG  MITTEL  ANZAHL  AUFTRG  KOSTEN
* LASTGZ  BEENDT  DLFZ   VERSPG  WERT
*
* 93      5      9.41    2      18620  166944
* 92      4      0.00    0      0      165038
* 91      8      10.16   4      21300  166789
* 90      8      9.13    7      37800  166872
* 89      0      0.00    0      0      0
* 88      0      0.00    0      0      0
* 87      0      0.00    0      0      0
*
* 92      5      9.44    4      25906  166860
*
* EINGABE (4) : 1 LOESCHEN ALLER WERTE
* EINGABE (1)-(7): DEFINITION DES AKTUELLEN
*                   STANDES ALS ALTERNATIVE 1-7
* EINGABE (8) : 1 WEITER IM PROGRAMM
*****
```

70/11

```
*****
*
* IN DER VORLIEGENDEN KOMBINIERTEN DYNAMISCHEN
* PRIORITAETSREGEL SIND 9 VERSCHIEDENE
* PRIORITAETSKRITERIEN ADDITIV VERKNUEPFT,
* WOBEI SIE JEDES KRITERIUM MIT EINEM GEWICHT
* VERSEHEN KOENNEN. DURCH POSITIVES VORZEICHEN
* KOENNEN SIE DIE NIEDRIGEN, DURCH NEGATIVES
* DIE HOEHEREN WERTE DER KRITERIEN BEVORZUGEN.
* BISHER WURDEN FOLGENDE WERTE EINGEGEBEN:      GEM
* 1 ANKUNFTSZEIT IN DER WERKSTATT                0
* 2 OPERATIONSZEITEN                             0
* 3 FERTIGUNGSZEITEN                             0
* 4 RESTFERTIGUNGSZEITEN                         1
* 5 UMRUESTZEITEN                                0
* 6 SCHLUPFZEITEN                                0
* 7 PRODUKTWERTE                                  0
* 8 WARTESCHLINGENLAENGE FOLGEMASCHINE           1
* 9 EXTERNE PRIORITAETEN                          0
* EINGABE: GANZZAHLIG ZWISCHEN +9 UND -9,
*          MINDESTENS EIN WERT #0
*****
```

Bild 71/15 (o.D.):

Entscheidungssebene 2.

Eingabe: S1

Bild 72/37 (o.D.):

Eintrag der neuesten Ergebnisse in die 5. Zeile des Alternativen-Vergleichs.

Eingabe: 5

Bild 73/37:

Damit ergibt sich das günstigste der bisher ermittelten Ergebnisse.

Eingabe: A1

73/37

					DATEM UHRZEIT
*ALTERNATIVEN-VERGLEICH					J 12.01

KAPAUJS	AUFTRG	MITTEL	ANZAHL	AJFTRG	KOSTEN
* LASTGX	UELEDT	DLFZ	VLRSFG	WERT	

* 93	5	9.41	2	18620	166944
* 92	0	.00	0	J	166838
* 92	4	10.16	4	21300	166789
* 92	8	9.13	7	37800	166372
* 89	11	7.44	6	63360	166865
* J	0	.00	0	J	0
* U	0	.00	0	J	0

* 91	7	9.14	4	35270	165861

*EINGABE (0) : LOESCHN ALLER WERTE					
*EINGABE (1)-(7) : DEFINITION DES AKTUELLEN					
STANDES ALS ALTERNATIVE 1-7					
*EINGABE (8) : WEITER IN PROGRAMM					

Bild 74/25:

Eingabe: A2

74/25

					DATEM UHRZEIT
*MASCHINENGRUPPEN-BERICHT					U 12.01

ADL3ED	UMR3ED	PLINST	ZUFAUS	KAPAUJS	
* LEERZT	LEERZT	LEERZT	LEERZT	LASTGX	

*MAGRP 11	.00	.10	.00	.00	90
*MAGRP 21	.00	.20	.00	.00	90
*MAGRP 31	.42	.47	.00	.00	87
*MAGRP 41	1.13	.10	.00	.00	88
*MAGRP 51	.00	.35	2.00	2.00	61
*MAGRP 61	.15	.07	.00	.00	96
*MAGRP 71	.00	.11	.00	.30	98
*MAGRP 81	2.08	.04	.00	.00	81
*MAGRP 91	.00	.00	.00	.00	99

*MITTEL41	.28	.20	.13	.13	88

*EINGABE (1) : WEITER IN PROGRAMM					
*EINGABE (2) : UEBERGANGSHAUFISKEIT					

Bild 75/33:

Eingabe: SEND

75/33

					DATEM UHRZEIT
*AUFTRAGS-BERICHT 1					U 12.01

AUFTRG	WERT	DLFZ	VERSFG	VERSPG	

*PROD 11	0	0	.00	0	.00
*PROD 21	0	0	.00	0	.00
*PROD 31	1	5760	10.22	0	.00
*PROD 41	0	0	.00	0	.00
*PROD 51	0	0	.00	0	.00
*PROD 61	9	54300	7.14	5	1.02
*PROD 71	1	3600	9.39	1	2.03
*PROD 81	0	0	.00	0	.00
*PROD 91	0	0	.00	0	.00

*GESAMT1	11	63360	7.44	6	1.02

*BITTE SEND					

Bild 76/28:

Eingabe: A3

```

76/28
*****
*                                DATUM UHRZEIT
*                                4      12.01
*
*****
*                                ANZAHL KAPITAL MITTEL UEBERG
*                                AUFTRG BINDUNG WARTZEIT ZEITEN
*
*****
*PROD 1:                16    79230          2.29    1.25
*PROD 2:                19   10640          1.17    1.15
*PROD 3:                15   80400          1.37    1.10
*PROD 4:                14   52750          3.57    1.20
*PROD 5:                16   52800          2.07    1.20
*PROD 6:                 5    3000           .37    1.00
*PROD 7:                13   40800          1.17    1.45
*PROD 8:                14   50520          5.19    .40
*PROD 9:                15   63000          2.11    1.30
*
*****
*GESAMT:                127  575900          2.19    1.16
*
*****
*ETNGBE (1)-(9) : STATUSBERICHT FUER PRODUKT 1-9
*ETNGBE (10) : WEITER IN PROGRAMM
*****

```

Bild 77/34:

Eingabe: A4

```

77/34
*****
* WARTESCHLANGEN-BERICHT                                DATUM UHRZEIT
*                                                           12.01
* =====
*                               MAXIMALE BELEGUNG (KAPAZITÄT) HOCHST-
*                               BELEGUNG AKTUELL                               GRENZE
* =====
* VOR MAGRP 11      22      20      89290      30
* VOR MAGRP 21      12      3      11653      30
* VOR MAGRP 31      3      0      0      30
* VOR MAGRP 41      17      16      51733      30
* VOR MAGRP 51      30      25      114820      30
* VOR MAGRP 61      16      16      74920      30
* VOR MAGRP 71      17      16      69243      30
* VOR MAGRP 81      7      2      8400      30
* VOR MAGRP 91      15      14      70600      30
* =====
* SUMME      1      --      112      500710      --
* =====
* *EINGABE (1) - (9) : EINZELERGEBNISSE HA-GRP 1-9
* *EINGABE (10) : WEITER IM PROGRAMM

```

Bild 78/47:

Nach der Betrachtung dieses Ergebnisses soll die Dialogsitzung beendet werden, obwohl das Ergebnis hinsichtlich der Fertigungsrate der Aufträge und des Bereichserfolgs noch keineswegs zufriedenstellend ist. Insbesondere durch Erweiterung von Maschinen- und Personalkapazitäten könnten diese Ergebnisse deutlich verbessert werden. Man hat sich jedoch im obigen Dialogbeispiel darauf beschränkt, durch kurzfristig durchführbare Maßnahmen eine Verbesserung in der Produktionsplanung zu erzielen.

Eingabe: OFF

```
78/47
```

* KOSTEN-LEISTUNG-BERICHT	DATUM UHRZEIT
	0 12.01
* WERT DER BISHER ABGESCHLOS-	
* SENEN AUFTRAGS (LEISTUNG)	63360
* MATERIALKOSTEN	120417
* MASCHINENKOSTEN	24214
* INSTANDHALTUNGSKOSTEN	148
* ZWISCHENLAGERKOSTEN	16219
* PERSONALKOSTEN	5842
* KAPITALBINDUNGSKOSTEN	25
* GESAMTKOSTEN	166865
* BEREICHSRFOHLS *(LEISTUNG-KOSTEN)	-103505
* BITTE SEND	

6. Simulationsexperimente

6.1. Auslegung und Bemessung der Simulationsexperimente

Dieser Teil der Untersuchung gründet sich auf die im 2. Abschnitt skizzierten Problemstellungen. Es ist dabei unmöglich, die Forderung nach der Vollständigkeit der Simulationsexperimente in bezug auf bestimmte Probleme zu erfüllen, da die Anzahl möglicher Kombinationen von Modellvarianten, Ausgangsbedingungen, Zufallszahlenfolgen und Einflußgrößen ins Unermeßliche steigen würde.

Angenommen, es sei folgende Experimentauslegung vorgesehen (Anzahl der Einzelversuche in Klammern):

- Zugrundeliegende Stammdatensätze	(5)
- Dynamischer Ankunftsprozeß: Mittlere Zwischenankunftszeiten	(2)
- Statischer Ankunftsprozeß: Anzahl der Aufträge	(2)
- Mittlere Laufzeit von Maschinengruppen	(2)
- Dauer von Zufallsreparaturen	(2)
- Dauer planmäßiger Instandhaltungsmaßnahmen	(2)
- Zufallszahlenfolgen für Auftragsauswahl	(2)
- Zufallszahlenfolgen für Zwischenankunftszeiten	(2)
- Gruppen von Zufallszahlenfolgen für Laufzeiten von Maschinengruppen	(2)
- Anordnung von Maschinengruppen	(4)
- Interne Prioritätskriterien	(4)
- Maschineneinsatz	(4)
- Personaleinsatz	(4)
- Instandhaltungsintervalle	(4)
- Dauer der Simulationszeit	(2)

Durch Kombination aller Einzelversuche ergibt sich bereits die unmöglich durchzuführende Anzahl von 2.621.440 Experimenten, obwohl die Anzahl der Varianten je Einflußgröße im Beispiel relativ gering ist und nicht alle Variablen verändert werden.

Man beachte auch, daß im Beispiel allein auf Benutzerebene (Abruf der Stammdaten, Entscheidungsebene 1 und 2) bereits 10.240 Experimente möglich sind.

Die in Abschnitt 6.2. gezeigten Simulationsexperimente können daher nur als eine sinnvolle - wenn auch unvollständige - Kombination von Einzelversuchen bezeichnet werden, in deren Auslegung und Bemessung eigene Erfahrungen mit dem Modell bereits mit eingebracht werden.

Grundsätzlich bietet das System folgende Variationsmöglichkeiten:

(1) Modellvarianten.

Darunter sind die dem Modell zugrunde liegenden Stammdaten (vgl. Abschnitt 4.2.2.) und Systemparameter (vgl. Abschnitt 4.2.1.) zu verstehen. Die Veränderung von Stammdaten oder von einem Teil derselben kann erfolgen:

- durch Laden neuer Stammdatensätze auf Magnetplatte mit Hilfe des Stammdaten-Generierungsprogramms in Stapelverarbeitung,
- durch Abruf verschiedener geladener Stammdatensätze im Dialog,
- durch Veränderung von Teilen der abgerufenen Stammdaten im Dialog.

Unter Systemparametern, die eine Modellvariante kennzeichnen, sind die in Punkt (2) des Abschnitts 4.2.1. genannten Werte zu verstehen, jedoch ohne die Bestandteile "Anzahl der Aufträge..." und "Multiplikatoren für ...".

Damit ergibt sich bereits eine Vielzahl von möglichen Modellvarianten.

(2) Ausgangsbedingungen.

Die Anzahl der Aufträge, die zu Beginn der Simulation zur Bearbeitung anstehen (vgl. Abschnitt 4.2.1., Punkt (2)) kann ein Simulationsergebnis erheblich beeinflussen. Von ihrer richtigen Wahl hängt die schnelle Überwindung von Startschwierigkeiten im Simulationsexperiment und damit die Qualität der Ergebnisse ab.

Es wird nämlich im Simulationslauf (bei Neubeginn) grundsätzlich vom Nullzustand (leere Maschinengruppen, leere Warteschlangen) aus angefangen, um den Benutzer nicht durch von ihm schlecht nachvollziehbare Ergebnisse zu verwirren.

Deshalb ist es um so wichtiger, gleich zu Beginn von einem durchschnittlichen Auftragsbestand und damit einer durchschnittlichen Kapazitätsauslastung auszugehen, wie sie der Situation im weiteren Ablauf des Experimentes entspricht. (Es ist ohnehin dafür gesorgt, daß Leerzeiten von Maschinengruppen erst ab dem Zeitpunkt ihrer Erstbelegung akkumuliert werden.)

Die Suche nach einem geeigneten Wert kann nicht durch ein exaktes Verfahren erfolgen, da ja die Kapazitätsauslastung in der Fertigung vor Simulationsbeginn eine Unbekannte darstellt und zudem noch von weiteren Faktoren (vgl. Punkte (3) und (4)) abhängig ist. Deshalb läßt sich für die Auftragsanzahl auch kein Richtwert angeben. Folgende Merkmale lassen jedoch Schlüsse auf eine falsche Wahl des Parameters zu:

- Wählt man den Wert zu klein, sind die Durchlaufzeiten der Aufträge anfangs sehr gering, da diese eine fast leere Werkstatt zu durchlaufen haben. Die Warteschlangen füllen sich nur sehr langsam, und die Durchlaufzeiten werden länger. Auch die Kapazitätsauslastung ist am Anfang deutlich schlechter als mit zunehmendem Simulationsfortschritt. Bei solch schlechten Anfangsbedingungen kommen auch Prioritätsregeln kaum zur Wirkung, da z.B. manche Aufträge, die bei vollen Warteschlangen zurückgestellt worden wären, an freien Maschinengruppen sofort bearbeitet werden können.
- Wählt man den Wert zu groß, verhalten sich Durchlaufzeiten und Kapazitätsauslastung genau umgekehrt.

Die Schwierigkeit bei Simulationsexperimenten besteht darin, daß einerseits Anfangswerte über eine Anzahl von Faktoreneinstellungen beibehalten werden müssen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen. Andererseits können durch veränderte Bedingungen in der Werkstatt (Kapazitätsauslastung etc.) andere Anfangswerte notwendig werden, um den für jede Einflußgrößenkombination günstigsten Start zu ermöglichen. In jedem Fall ist bei der Verwendung gleicher Anfangswerte für eine

ganze Experimentfolge zu prüfen, ob sich für jede Faktoreinstellung die Ergebnisse bei verlängertem Planungshorizont in derselben Richtung weiter entwickeln oder ob Schwankungen darauf hindeuten, daß Startschwierigkeiten noch nicht überwunden sind.

(3) Zufallszahlenfolgen.

Sie werden durch die in Abschnitt 4.2.1., Punkt (2), bezeichneten Multiplikatoren bestimmt. Mit Hilfe eines Testprogramms wurde ermittelt, daß sich folgende Werte im Hinblick darauf günstig erwiesen, innerhalb relativ weniger Generierungsvorgänge eine brauchbare Gleichverteilung zu erzeugen:

3	4	9	11	12	13	17	19	21	23	27	28	29
31	33	37	38	41	47	48	52	53	58	59	61	63
64	69	72	73	77	78	79	83	84	87	88	89	91
92	97	98	103	104	108	109	111	112	113	117	121	127
128	129	131	133	137	139	141	144	148	152	153	158	159

Zufallszahlenfolgen beeinflussen neben den Produktnummern eintreffender Aufträge, den Zwischenankunftszeiten und den Laufzeiten insbesondere auch die Zusammensetzung des Auftragsbestandes, der bei Simulationsbeginn zur Bearbeitung ansteht.

(4) Einflußgrößen.

Sie werden vom Benutzer auf den beiden Entscheidungsebenen (vgl. Abschnitt 4.2.3. und 4.2.4.) variiert.

Bei allen Experimenten hat sich herausgestellt, daß diese trotz exakter Planung anders abliefen, als es sich voraussehen ließ. Manche Varianten erwiesen sich als überflüssig, während ungeplante Parameteränderungen weitaus bessere Ergebnisse lieferten. Damit kann sich die statische Faktorenauslegung im Rahmen eines umfassenden Simulationsmodells nur noch zum Test eng umgrenzter Problemkreise, wie z.B. der Anwendung bestimmter einfacher Prioritätsregeln, eignen.

Will man jedoch die ganze Bandbreite von Entscheidungsmöglichkeiten im vorliegenden Modell nutzen, ist dies nur im Rahmen einer dynamischen Faktorenauslegung möglich.

Auch wird im folgenden Abschnitt versucht, nicht nur mit konstanten Anfangsbedingungen und über festgelegte Zeiträume hinweg, sondern im Zeitablauf selbst Faktoren zu variieren. Damit tritt der Zeitpunkt einer Faktoränderung (z.B. Umschalten auf eine andere Prioritätsregel) als weiterer Bestandteil zur Auslegung eines Experiments hinzu.

6.2. Simulationsläufe

Die zunächst präsentierten Versuchsreihen zeigen den Test einfacher Prioritätsregeln unter verschiedenen Fertigungsbedingungen (Stammdaten) und zweierlei Ankunftsprozessen (statisch und dynamisch, vgl. Abschnitt 3.2.1.1.). In umfangreichen Untersuchungen, die aus Platzgründen im Anhang (Abschnitt 8.8.) erscheinen, zeigt sich, daß für Experimente, die über den Test einfacher Prioritätsregeln und ihrer Wirkungsweise hinausgehen, bessere Versuchsstrategien entwickelt und angewandt werden müssen.

Eine zweite Gruppe von Versuchen demonstriert anhand von drei komplexeren Entscheidungsproblemen eine iterative Vorgehensweise, wie sie von den meisten Benutzern während des Dialogs intuitiv verfolgt wurde. Auch das in Abschnitt 5.4. beschriebene Beispiel einer Dialogsitzung steht stellvertretend für diese Art der Versuchsstrategie.

6.2.1. Lösung einfacher Entscheidungsprobleme

6.2.1.1. Experimentanordnung

Fertigungs- vorschriften	1111	2222	3333	4444	5555
Versuch-Nr.	1	2	3	4	5
statischer Ankunfts- prozeß	FCFS K0Z L0Z KFZ LFZ KRFZ LRFZ KURZ KSZ 1 KAP KMR KSZ 2 1)	FCFS K0Z L0Z KFZ LFZ KRFZ LRFZ KSZ KAP KMR KSZ 2 1)	FCFS K0Z L0Z KFZ LFZ KRFZ LRFZ KSZ KMR	FCFS K0Z L0Z KRFZ LRFZ KSZ 1 KSZ 2 1)	FCFS K0Z L0Z KRFZ LRFZ KSZ
Versuch-Nr.	6	7	8	9	10
dynamischer Ankunfts- prozeß	FCFS 1 FIS LIS K0Z L0Z KFZ LFZ KRFZ LRFZ KURZ KSZ 1 KAP KMR FCFS 2 2) KSZ 2 1)	FCFS FIS LIS K0Z L0Z KFZ LFZ KRFZ LRFZ KSZ KAP KMR	FCFS FIS LIS K0Z L0Z KFZ LFZ KRFZ LRFZ KSZ KMR	FCFS FIS LIS K0Z KRFZ KSZ	FCFS LIS K0Z KRFZ KSZ
1) KSZ-Regel unter knapper Terminalsituation 2) FCFS-Regel mit anderen Zufallszahlenfolgen					

6.2.1.2. Auswertungsmethoden

Die Zwischen- bzw. Endergebnisse, die aus einem Simulationslauf resultieren, präsentieren sich dem Benutzer auf verschiedene Weise:

- (1) Im Dialog in Form von verschiedenen Berichtsebenen, angefangen vom globalen Alternativen-Vergleich bis zum detaillierten Status-Bericht einzelner Produkte,
- (2) nach dem Dialog - falls der Anwender das wünscht - in Form von Ergebniszeilen, d.h. einer kompakten Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse auf einer Zeile des Schnelldruckers. Diese Ausgaben sind in der vorliegenden Arbeit als Ergebnistabellen zusammengefaßt.

Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Versuche im MMK-Dialog durchzuführen, deren Ergebnisse jedoch zusätzlich mitprotokollieren zu lassen, was eine spätere Auswertung der gewonnenen Daten zuläßt.

In den Tabellen und Abbildungen des Abschnitts 6.2.3. sind beispielhaft die Resultate der Versuche 2 und 6 aufgeführt, wobei folgende Möglichkeiten der Auswertung gewählt wurden:

- (1) Ergebnistabellen (Tab. 10 - 11)
- (2) Ergebnismuster (Tab. 12 - 13)
- (3) Grafische Darstellung von Einzelergebnissen (Abb. 5 - 10)

Zu (1):

Die Ergebnistabellen stellen je Zeile ein Abbild der im Dialog gewonnenen Werte dar. Neben der Uhrzeitangabe als Orientierungshilfe bei der Betrachtung der Ergebnisse ist die restliche Zeile nach der im Dialog verwendeten Aufteilung aufgebaut. Dieses umfangreiche Datenmaterial kann jedoch nur als Grundlage für eine weitere Auswertung dienen.

Zu (2):

In Anlehnung an Fogler⁶¹⁾, der das Verfahren des "Pattern recognition" für Prognoseprobleme einsetzte, soll hier ein weiterer Anwendungsfall geschaffen werden.

Ausgehend von der Ergebnistabelle ist für alle getesteten Alternativen (hier: Prioritätsregeln) je Zeitpunkt das arithmetische Mittel zu berechnen. Liegt der betrachtete Wert über dem Durchschnitt, wird an die betreffende Stelle des Ergebnismusters ein "+", andernfalls ein "-" eingetragen. Mit dieser Vorgehensweise ist noch keine Wertung der Ergebnisse verbunden, da z.B. ein "+" beim Kriterium der Kapazitätsauslastung als positiv, beim Kriterium der mittleren Durchlaufzeiten als negativ zu beurteilen ist.

Weitere Verfeinerungen gingen in die Auswertung mit ein:

- "0" - Werte bedeuten, daß der Wert genau dem Durchschnitt entspricht,
- "(+)" - Werte liegen knapp über dem Durchschnitt (+ 0,1),
- "(-)" - Werte liegen knapp unter dem Durchschnitt (- 0,1),
- bei den Versuchen 1 - 5 werden alle letzten Ergebnisse je Prioritätsregel unabhängig vom Abschlußzeitpunkt einheitlich bewertet,
- auch die Abschlußzeitpunkte selbst werden bei allen Versuchen verglichen,
- ist ein Wert nicht definiert (z.B. mittlere Durchlaufzeiten, wenn noch keine Aufträge abgeschlossen sind), geht er nicht in die Durchschnittsberechnung ein, während z.B. eine Null bei abgeschlossenen Aufträgen berücksichtigt wird.

⁶¹⁾ vgl. Fogler, H. R., A Pattern Recognition Model for Forecasting, Management Science 20 (1974), S. 1178 ff.

Zu (3):

Die grafische Darstellung einzelner Ergebnisse, z.B. der Kapazitätsauslastung, der Zeit der Fertigstellung eines Produktionsprogramms und der Anzahl abgeschlossener Aufträge kann dazu dienen, die Ergebnisse transparenter zu gestalten; sie bringt jedoch den Nachteil mit sich, daß sich umfangreiche Ergebnisse nicht kompakt genug darstellen lassen.

6.2.1.3. Ausgewählte Simulationsergebnisse

Dieses Kapitel enthält lediglich einen Ausschnitt aus den Simulationsergebnissen und deren Auswertung (Versuche 2 und 6).

Legende zu den Ergebnistabellen:

Kosten	(16)	Gesamtkosten in 1000 DM
	(15)	Maschinenkosten in 1000 DM
	(14)	Materialkosten in 1000 DM
Warte- schl.	(13)	Kapitalbindung in der Warteschlange in 1000 DM
	(12)	Aktuelle Länge aller Warteschlangen (Summe)
Aufträge im System	(11)	Mittlere Wartezeit vor jeder Maschinengruppe ¹⁾
	(10)	Kapitalbindung gesamt in 1000 DM
	(9)	Anzahl der Aufträge
	(8)	Mittlere Terminverspätung ¹⁾
Aufträge fertig	(7)	Anzahl verspätet abgeschlossener Aufträge
	(6)	Mittlere Durchlaufzeit ¹⁾
	(5)	Wert abgeschlossener Aufträge in 1000 DM
	(4)	Anzahl abgeschlossener Aufträge
Maschinen- gruppen	(3)	Kapazitätsauslastung in %
	(2)	Durch Umrüsten bedingte Leerzeiten ¹⁾
	(1)	Ablaufbedingte Leerzeiten ¹⁾
Uhr- zeit		Uhrzeit
Prior.- regel		Abkürzungen siehe Abschnitt 8.2.

¹⁾ Stunden und Minuten sind durch einen Punkt getrennt (5.4 = 5 Stunden und 40 Minuten). Steht nach dem Punkt "6", so bedeutet dies einen Wert von mehr als 55 Minuten.

An manchen Stellen wurden Sternchen abgedruckt. Dies bedeutet, daß der entsprechende Wert nicht definiert ist.

prior.- regel	Uhr- zeit	Maschinen- gruppen	Aufträge fertig	Aufträge im System	Warte- schl.	Kosten
		(1) (2) (3)	(4) (5) (6) (7) (8)	(9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16)		
FCFS	6.0	1.4 0.1 69.8	0.0 0.0*****	99.0455.0 1.3	87.0398.6	86.2 12.5 125.2
	12.0	2.3 0.2 76.6	20.0118.5 10.1 0.0 0.0	73.0335.4 1.3	53.0265.7	86.4 25.3 164.8
	18.0	4.3 0.2 71.9	91.0417.6 13.3 15.0 0.1	8.0 37.4 1.2	4.0 18.3	86.6 37.8 204.1
	13.2	5.4 0.2 56.0	93.0455.0 13.6 15.0 0.1	0.0 0.0 1.2	0.0 0.0	86.6 40.3 212.2
	5.0	0.5 0.1 83.2	20.0105.5 4.2 0.0 0.0	79.0343.5 1.0	62.0271.6	86.3 12.7 125.5
KOZ	12.0	1.5 0.1 82.7	54.0244.6 7.1 0.0 0.0	45.0211.3 1.1	29.0132.5	86.4 25.5 164.9
	18.0	4.2 0.2 73.0	95.0431.9 10.3 3.0 0.0	4.0 23.0 0.6	1.0 5.3	86.6 37.7 203.9
	13.2	5.2 0.2 69.4	93.0455.0 10.5 0.0 0.0	0.0 0.0 0.6	0.0 0.0	86.6 40.1 211.7
	5.0	1.5 0.0 67.6	4.0 23.0 5.3 3.0 0.0	95.0431.9 2.1	87.0388.3	86.2 12.5 125.2
	12.0	3.3 0.0 63.7	21.0137.2 8.4 1.0 0.0	78.0347.8 2.0	61.0266.4	86.4 25.1 164.7
LOZ	18.0	5.5 0.1 65.8	55.0274.3 11.5 9.0 0.1	44.0180.1 1.3	34.0133.6	86.5 37.4 203.4
	21.4	8.2 0.1 60.4	99.0455.0 15.2 43.0 1.4	0.0 0.0 1.3	0.0 0.0	86.6 44.7 227.0
	5.0	1.1 0.0 78.2	21.0101.7 4.1 3.0 0.0	78.0353.3 1.6	59.0274.8	86.3 12.6 125.4
	12.0	2.1 0.1 79.7	53.0239.1 6.5 3.0 0.0	46.0215.8 1.2	35.0167.4	86.4 25.4 164.9
	18.0	4.5 0.1 71.8	87.0392.3 10.1 0.0 0.0	12.0 62.6 0.6	5.0 32.1	86.6 37.8 204.1
KFZ	19.3	5.5 0.1 68.1	99.0455.0 11.1 0.0 0.0	0.0 0.0 0.6	0.0 0.0	86.6 40.5 212.9
	5.0	1.2 0.0 74.4	13.0 71.3 4.5 9.0 0.0	86.0383.7 2.4	75.0331.1	86.2 12.6 125.4
	12.0	2.5 0.1 75.1	43.0188.5 7.5 0.0 0.0	59.0266.4 1.5	48.0213.1	86.4 25.2 164.7
	18.0	4.5 0.1 70.8	88.0415.7 12.1 23.0 0.5	11.0 39.3 1.2	4.0 14.4	86.6 37.6 203.7
	20.3	6.3 0.1 65.7	93.0455.0 12.6 34.0 1.1	0.0 0.0 1.1	0.0 0.0	86.6 41.6 216.7

Tab. 10a : Versuch 2: Ergebnistabellen

Prior.- Regel	Uhr- zeit	Maschinen- gruppen			Aufträge fertig				Aufträge im System			Warte- schl.		Kosten			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
KRFZ	5.0	0.5	0.1	83.0	24.0416.8	4.1	0.0	0.0	0.0	75.0333.2	1.5		59.0278.1		86.3	12.7	125.5
	12.0	1.5	0.1	82.0	59.0255.4	5.5	0.0	0.0	0.0	40.0493.6	1.1		29.0443.1		86.5	25.5	165.0
	20.0	4.3	0.2	71.7	32.0421.5	9.4	0.6	0.0	0.0	7.0	33.5	0.5	0.0	0.1	86.6	37.7	203.8
	19.1	5.3	0.2	69.3	99.0455.0	10.2	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	86.6	39.8	211.7
LRFZ	5.0	2.2	0.0	59.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0455.0	2.1		89.0404.5		86.2	12.3	125.0
	12.0	3.2	0.0	70.7	2.0	9.1	9.3	0.0	0.0	97.0445.8	1.4		82.0370.0		86.4	25.1	164.5
	19.0	5.2	0.1	69.6	59.0285.6	15.4	17.0	0.3	0.3	40.0163.3	1.4		32.0438.9		86.6	37.6	203.7
	19.5	6.3	0.1	66.3	99.0455.0	16.6	41.0	1.2	1.2	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	86.6	41.2	215.3
KSZ	5.0	1.3	0.0	73.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0455.0	1.4		86.0394.0		86.2	12.5	125.2
	12.0	2.2	0.1	78.2	5.0	22.3	9.3	0.0	0.0	94.0432.6	1.4		77.0361.7		86.4	25.3	164.7
	13.0	4.3	0.1	73.4	88.0400.4	14.4	8.0	0.0	0.0	11.0	54.6	1.2	5.0	26.6	86.6	37.7	203.8
	16.5	5.0	0.1	71.2	99.0455.0	15.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	86.6	39.3	203.1
KAP	5.0	1.5	0.0	67.2	18.0106.2	3.6	3.0	0.0	0.0	81.0348.8	2.4		67.0277.3		86.2	12.5	125.2
	12.0	2.5	0.1	74.0	40.0223.3	6.4	0.0	0.0	0.0	59.0231.7	1.5		47.0181.3		86.4	25.2	164.6
	13.0	5.4	0.1	66.6	72.0359.9	10.0	2.0	0.0	0.0	27.0	95.1	1.2	15.0	51.6	86.5	37.4	203.4
	21.5	8.2	0.1	60.2	99.0455.0	12.4	22.0	1.1	1.1	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	86.6	44.9	227.9
KMR	5.0	0.4	0.1	86.6	21.0	93.6	4.5	0.0	0.0	78.0351.3	1.3		64.0295.8		86.3	12.8	125.6
	12.0	1.1	0.2	86.9	65.0295.4	7.5	0.0	0.0	0.0	34.0159.6	1.1		17.0	77.4	86.5	25.7	165.2
	17.0	3.2	0.2	77.4	99.0455.0	10.1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	86.6	36.0	197.9

Tab. 10b : Versuch 2: Ergebnistabellen

Prior.- Regel	Uhr- zeit	Maschinen- gruppen			Aufträge fertig				Aufträge im System			Warte- schl.			Kosten			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	
FDPS 1	6.0	0.3	1.4	63.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	84.0511.5	0.6	70.0464.8	106.1	8.8	132.2			
	12.0	0.4	4.2	57.3	3.0	39.3	9.1	0.0	0.0	135.6622.9	1.2	91.0531.0	140.0	17.1	194.5			
	18.0	0.9	7.1	54.7	75.1	193.7	14.1	12.0	1.2	103.9610.9	1.5	93.0552.4	171.6	25.4	282.5			
	3.0	1.1	3.5	54.4	59.0	337.6	16.4	25.0	2.0	98.0592.9	1.6	84.0486.4	195.6	33.7	362.7			
	6.0	1.1	12.4	53.2	75.1	245.1	13.1	18.4	37.0	3.0	103.7600.0	2.0	87.0523.3	225.0	41.9	359.6		
	17.0	1.7	15.2	52.6	98.0	575.2	20.3	56.0	4.4	113.7060.9	2.1	100.0588.0	262.3	50.1	422.5			
	9.0	0.3	1.5	62.7	1.0	5.0	5.3	0.0	0.0	93.0496.6	0.6	65.0393.8	136.1	8.8	132.2			
FIS	12.0	0.4	4.2	57.2	35.1	147.7	9.4	2.0	0.0	89.0514.5	1.2	75.0438.4	140.6	17.1	194.4			
	18.0	0.0	6.4	57.2	60.1	360.9	12.3	9.0	0.1	78.0443.7	1.3	66.0376.4	171.6	25.7	252.4			
	3.0	1.5	9.2	54.6	79.0	465.4	13.5	20.0	0.5	77.0455.2	1.4	65.0383.6	195.6	33.3	332.9			
	6.0	1.6	11.0	54.1	182.1	355.5	15.1	34.0	1.2	77.0468.7	1.4	62.0373.3	225.0	42.2	359.9			
	12.0	2.2	14.1	53.6	122.1	374.9	16.1	48.0	1.5	99.0527.2	1.4	77.0440.1	262.3	50.1	422.8			
	6.0	0.2	2.1	57.4	1.0	5.0	4.2	0.0	0.0	93.0496.6	1.0	65.0366.6	136.1	8.8	132.1			
	12.0	0.3	4.5	54.7	11.0	56.5	6.3	0.0	0.0	103.0615.6	1.3	85.0508.8	140.6	16.9	194.1			
LIS	18.0	0.4	7.3	53.4	18.0	98.5	6.4	0.0	0.0	120.0716.1	1.5	108.0642.8	171.5	25.2	251.8			
	3.0	0.5	10.1	53.8	41.0	228.1	7.5	3.0	0.1	115.0692.5	2.0	102.0600.3	195.6	33.7	332.7			
	6.0	0.6	12.5	52.3	73.1	242.1	9.1	9.0	0.3	136.0635.1	2.1	95.0577.5	225.0	42.0	358.7			
	12.0	1.1	15.3	52.7	84.1	248.2	9.2	11.0	0.4	127.0755.9	2.2	110.0665.3	262.3	50.2	422.6			
	6.0	0.2	2.1	57.1	6.0	27.5	4.4	0.0	0.0	78.0474.0	1.2	64.0396.9	136.1	8.6	132.1			
	12.0	0.4	4.5	54.2	15.0	165.3	8.0	0.0	0.0	79.0496.9	1.4	55.0405.2	140.6	16.9	194.2			
	18.0	0.4	7.2	54.8	57.0	309.2	8.6	8.0	0.0	61.0495.4	1.6	67.0415.9	171.6	25.4	251.5			
K02	6.0	1.0	9.6	51.6	80.0	433.0	9.5	3.0	0.2	76.0447.6	2.1	61.0396.6	195.6	33.6	332.7			
	6.0	1.3	12.3	52.6	102.0	576.1	11.0	13.0	0.3	77.0483.2	2.2	65.0417.7	224.9	41.8	358.5			
	12.0	2.0	15.2	51.4	125.0	704.4	11.3	19.0	0.6	86.0531.7	2.3	71.0448.6	262.3	49.9	422.3			

Tab. 11a : Versuch 6; Ergebnistabellen

prior.- Regel	Uhr- zeit	Maschinen- gruppen				Aufträge fertig				Aufträge im System				Warte- schl.	Kosten			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)		(13)	(14)	(15)	(16)
LOZ	6.0	0.4	1.1	67.6	1.0	5.3	5.4	0.0	3.3	83.0496.6	1.1		67.0374.7	106.1	9.0	133.5		
	12.0	1.3	2.5	62.7	13.3129.9	9.3	0.0	0.0		96.0532.3	1.5		84.0451.2	140.7	17.5	194.9		
	18.0	2.0	4.5	61.0	41.0280.9	11.2	4.0	0.2		97.0523.7	2.2		85.0436.8	171.6	26.2	252.9		
	0.0	2.5	6.4	60.2	65.3425.0	12.4	13.0	0.6		91.0495.6	2.4		81.0418.5	195.7	34.7	303.9		
	6.0	3.5	3.2	59.0	91.0597.2	14.0	26.0	2.3		88.0462.1	2.3		76.0399.7	225.0	43.1	359.9		
	12.0	4.3	10.1	58.5	119.0742.0	16.2	48.0	4.1		92.0494.1	2.2		82.0429.7	262.4	51.7	424.2		
KFZ	6.0	0.3	1.5	51.4	19.0	65.7	4.5	0.0	0.0	65.0415.8	1.2		53.0339.2	106.1	8.7	133.2		
	12.0	0.4	4.4	54.3	41.0192.4	5.5	0.0	0.0		73.0469.8	1.5		63.0412.8	140.6	16.8	194.2		
	18.0	1.3	7.2	53.3	59.0277.6	6.2	1.0	0.0		79.0527.0	2.1		64.0448.1	171.5	24.8	251.4		
	0.0	2.0	9.4	50.3	85.0403.6	7.2	7.0	0.1		71.0517.0	2.2		59.0446.7	195.6	33.2	302.2		
	6.0	2.3	11.5	51.8	110.0534.8	8.4	17.0	0.3		69.0524.5	2.0		54.0451.0	224.9	41.7	358.1		
	12.0	3.0	14.1	51.7	127.0618.4	9.1	21.0	0.4		84.0617.7	2.1		72.0552.0	262.3	50.0	422.4		
LFZ	6.0	5.3	1.2	68.8	2.0	15.0	5.3	0.0	0.0	82.0485.5	1.2		69.0384.2	106.1	9.0	133.5		
	12.0	1.1	3.3	64.4	25.0213.6	7.5	0.0	0.0		89.0448.6	2.1		78.0377.7	140.7	17.7	195.1		
	18.0	1.4	4.5	63.6	48.0360.1	9.0	0.0	0.0		90.0444.4	2.4		79.0375.6	171.6	26.4	253.1		
	0.0	2.3	6.3	62.3	65.0466.3	9.6	6.0	0.4		91.0454.3	2.2		82.0398.2	195.7	35.0	304.2		
	6.0	3.2	3.3	60.4	85.0588.7	11.2	16.0	1.2		94.0479.6	2.3		82.0406.2	225.1	43.4	360.2		
	12.0	3.4	10.5	59.3	133.0706.3	11.2	19.0	1.4		108.0523.8	2.4		90.0428.6	262.4	51.7	424.3		
KRFZ	6.0	0.2	2.1	50.7	13.0	46.6	4.3	0.0	0.0	66.0415.0	1.2		51.0336.0	106.1	8.6	133.7		
	12.0	0.6	4.3	53.7	42.0219.2	5.6	0.0	0.0		72.0453.0	1.5		59.0365.6	140.6	16.8	194.1		
	18.0	1.3	6.5	53.1	65.0354.0	7.4	4.0	0.0		73.0450.6	2.1		56.0343.8	171.5	25.2	251.6		
	0.0	2.1	8.5	53.0	93.0543.9	8.5	5.0	0.0		83.0376.7	2.4		55.0319.1	195.6	37.5	302.5		
	6.0	3.1	11.0	52.3	113.0661.8	9.4	6.0	0.0		66.0397.4	2.6		55.0329.2	224.9	41.6	358.3		
	12.0	4.1	13.1	51.3	129.0769.4	9.4	6.0	0.0		82.0466.7	2.6		64.0376.5	262.3	49.7	422.1		

Tab. 11b : Versuch 6: Ergebnistabellen

Prior.- Regel	Uhr- zeit	Maschinen- gruppen		Aufträge fertig					Aufträge im System	Warte- schl.	Kosten						
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)			(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
LRFZ	5.1	9.3	1.2	65.1	0.1	0.0	*****	*****		84.0501.5	1.1			75.0402.0	106.1	9.0	133.5
	12.0	0.5	3.2	64.9	2.0	15.0	11.2	0.0	0.0	112.0647.2	1.4			96.0552.5	146.7	17.7	195.1
	18.0	1.1	5.3	62.9	11.0	82.5	12.4	0.0	0.0	127.0722.1	1.6			112.0634.8	171.6	26.3	253.1
	3.0	1.5	7.1	62.1	25.0	82.7	16.1	9.0	2.4	131.0745.5	2.2			119.0656.3	195.7	35.0	304.2
	6.0	2.3	9.2	60.3	45.0	83.4	6.0	19.2	17.0	134.0713.2	2.3			121.0634.9	225.1	43.3	366.0
	12.0	7.5	11.4	59.3	56.0	84.7	1.1	20.2	24.0	155.1819.0	2.4			137.0714.2	262.4	51.8	424.3
KURZ	6.0	5.7	1.4	63.7	1.0	3.8	4.0	0.0	0.0	83.0497.8	1.3			71.0399.7	106.1	8.9	133.3
	12.0	0.5	3.4	61.0	22.0	175.1	8.4	2.0	0.0	92.0487.1	1.6			80.0414.8	140.7	17.5	194.9
	18.0	1.2	6.0	58.7	47.0	321.7	10.0	8.0	0.4	91.0482.9	2.1			80.0422.0	171.6	25.9	252.5
	0.0	2.1	8.0	50.9	64.0	2410.9	11.3	20.0	1.3	92.0509.7	2.2			80.0424.8	195.7	34.2	303.3
	6.0	3.0	17.0	56.7	89.0	565.0	12.3	30.0	1.5	91.0474.2	2.3			74.0380.0	225.0	42.4	359.2
	12.0	7.3	12.4	54.0	127.0	591.3	12.3	36.0	1.5	104.0544.3	2.3			92.0471.0	262.3	50.7	422.2
KSZ 1	6.0	0.3	1.3	66.1	3.0	0.0	*****	*****		84.0501.5	1.1			72.0430.3	106.1	8.9	133.4
	12.0	0.4	3.4	63.9	29.0	134.5	8.3	0.0	0.0	85.0527.7	1.3			72.0461.0	140.7	17.6	195.0
	18.0	0.6	5.5	61.7	58.0	274.0	9.5	2.0	0.0	80.0530.6	1.4			66.0448.9	171.6	26.1	252.8
	0.0	1.5	7.4	59.9	85.0	433.7	11.2	9.0	0.2	70.0486.9	1.5			54.0369.5	195.7	34.5	303.7
	6.0	2.4	9.1	60.0	105.0	561.6	13.1	19.0	0.5	73.0497.6	1.4			61.0386.8	225.1	43.2	360.0
	12.0	3.3	10.6	59.2	129.0	716.3	14.3	26.0	1.0	82.0519.8	1.3			64.0417.8	262.4	51.6	424.1

Tab. 11c : Versuch 6: Ergebnistabellen

prior.- Regel	Uhr- zeit	Maschinen- gruppen	Aufträge fertig	Aufträge im System	Warte- schl.	Kosten
		(1) (2) (3)	(4) (5) (6) (7) (8)	(9) (10) (11) (12) (13)	(14) (15) (16)	
KAP	6.0	0.2 1.4 50.8	5.0 57.2 5.1 0.0 0.0	79.0449.3 1.2	67.0043.3 136.1 9.0 133.4	
	12.0	0.6 3.2 63.4	24.0204.0 7.5 0.0 0.0	90.0458.2 2.1	79.0391.8 140.7 17.6 194.9	
	18.0	1.3 5.2 61.7	41.0322.9 8.5 3.0 0.1	97.0431.6 2.6	83.0395.6 171.5 26.1 252.9	
	0.0	2.1 7.2 60.3	73.0512.8 12.0 18.0 1.2	83.0407.8 2.5	73.0346.6 195.7 34.6 303.7	
	6.0	2.4 9.2 59.2	32.0540.9 11.5 20.0 1.2	87.0418.4 2.4	78.0358.6 225.0 43.0 359.8	
	12.0	3.1 11.3 58.5	112.0755.5 12.2 25.0 1.4	99.0463.5 2.4	84.0375.5 262.4 51.5 424.1	
	0.0	0.1 1.3 65.0	0.0 0.0*****	84.0501.5 0.6	69.0392.8 136.1 8.9 133.3	
	12.0	0.2 4.1 61.2	25.0142.7 9.3 0.0 0.0	91.0519.4 1.2	75.0433.6 140.7 17.4 194.8	
	18.0	0.2 6.5 59.6	44.0290.0 12.1 3.0 0.2	94.0508.6 1.3	81.0441.8 171.6 25.9 252.6	
	0.0	0.4 9.1 50.6	57.0419.0 14.5 22.0 1.4	89.0501.6 1.4	77.0435.5 195.7 34.4 303.5	
FCFS 2	6.0	0.2 1.4 64.3	0.0 0.0*****	85.0499.5 0.6	70.0409.3 136.1 8.8 133.3	
	12.0	1.0 4.1 56.4	10.0 47.8 10.6 0.0 0.0	102.0610.8 1.3	91.0539.3 139.6 17.1 193.4	
	18.0	2.2 5.5 54.2	29.0157.0 13.5 5.0 0.4	106.0632.7 1.5	95.0550.4 167.7 25.4 248.2	
	0.0	1.4 9.2 53.7	57.0333.4 17.2 24.0 2.4	99.0593.7 1.6	89.0532.5 196.6 33.7 303.7	
	6.0	1.5 12.1 53.0	74.0344.2 19.1 34.0 3.2	105.0619.8 2.0	94.0541.7 224.0 42.0 357.7	
	12.0	2.5 15.6 52.3	95.0557.9 20.6 55.0 5.1	112.0664.8 2.1	101.0609.4 259.6 50.2 419.9	
	6.0	0.1 1.3 70.7	0.0 0.0*****	86.0501.5 0.6	70.0403.1 136.1 9.1 133.6	
	12.0	0.5 3.3 60.4	0.0 0.0*****	114.0602.2 1.2	105.0609.4 140.7 17.6 195.0	
	18.0	1.3 5.2 62.0	24.0134.2 15.2 0.0 0.0	114.0670.3 1.5	98.0570.4 171.6 26.2 252.9	
	0.0	2.4 6.4 54.4	52.0391.8 15.3 10.0 0.2	94.0528.8 1.5	79.0448.6 195.8 35.3 304.5	
KSZ 2	6.0	1.5 9.5 64.0	113.0681.4 18.6 45.0 1.4	66.0397.9 1.5	52.0305.1 225.1 44.0 360.9	
	12.0	2.3 10.4 63.3	147.0875.3 18.5 60.6 1.4	64.0360.8 1.5	56.0310.3 262.5 52.7 425.3	

Tab. 11d : Versuch 6: Ergebnistabellen

Prior Regel	Uhrzeit	Maschinen-	Aufträge fertig					Aufträge im System			Warte-	Kosten		
		gruppen									schl.			
FCFS	6.0	+ (+) -	- -					+ + -	+ +	0 (-) (-)				
	12.0	0 (+) -	- - + 0 0					+ + 0	+ +	0 0 0				
	18.0	- (+) +	+ + + + 0					- - (+)	- -	0 + +				
	-	- (+) +	0 0 + - -					0 0 (+)	0 0	0 - -				
KQZ	6.0	- (+) +	+ + (-) 0 0					- - 0	- -	(+) (+) +				
	12.0	- 0 +	+ + - 0 0					- - 0	- -	0 + (+)				
	18.0	- (+) +	+ + + - (-)					- - (-)	- -	0 + (+)				
	-	- (+) +	0 0 - - -					0 0 -	0 0	0 - -				
LOZ	6.0	+ 0 -	- - + 0 0					+ + (+)	+ +	0 (-) (-)				
	12.0	+ (-) -	- - + 0 0					+ + +	+ +	0 - (+)				
	18.0	+ 0 -	- - 0 + 0					+ + +	+ +	(-) - -				
	+	+ 0 -	0 0 + + +					0 0 +	0 0	0 + +				
KFZ	6.0	(-) 0 +	+ + - 0 0					- - 0	- -	(+) 0 (+)				
	12.0	- 0 +	+ + - 0 0					- - (-)	- -	0 (+) (+)				
	18.0	0 0 +	+ + - - (-)					- - (-)	- -	0 + +				
	(-)	(-) 0 +	0 0 - - -					0 0 (-)	0 0	0 - -				
LFZ	6.0	0 0 (-)	+ + + 0 0					- - +	+ +	0 0 (+)				
	12.0	+ 0 -	+ + (-) 0 0					- - +	+ +	0 (-) (-)				
	18.0	0 0 (+)	+ + + + +					- - (+)	- -	0 0 (-)				
	-	+ 0 -	0 0 (+) + +					0 0 0	0 0	0 + +				
KRFZ	6.0	- (+) +	+ + - 0 0					- - (-)	- -	(+) (+) +				
	12.0	- 0 +	+ + - 0 0					- - -	- -	(+) + +				
	18.0	- (+) +	+ + - - (-)					- - -	- -	0 (+) 0				
	-	- (+) +	0 0 - - -					0 0 -	0 0	0 - -				
LRFZ	6.0	+ 0 -	- - + 0 0					+ + (+)	+ +	0 - -				
	12.0	+ (-) -	- - + 0 0					+ + (+)	+ +	0 - -				
	18.0	+ 0 -	- - + + +					+ + +	+ +	0 0 (-)				
	(+)	+ 0 -	0 0 + + +					0 0 +	0 0	0 - +				
KSZ	6.0	(+) 0 -	- - + 0 0					+ + -	+ +	0 (-) (-)				
	12.0	(-) 0 +	- - + 0 0					+ + (+)	+ +	0 0 (-)				
	18.0	- 0 +	+ + + - (-)					- - (+)	- -	0 (+) 0				
	-	- 0 +	0 0 + - -					0 0 (+)	0 0	0 - -				
KAP	6.0	+ 0 -	+ + - 0 0					- - +	- -	0 (-) (-)				
	12.0	+ 0 -	+ + - 0 0					- - +	(+) -	0 (-) -				
	18.0	+ 0 -	- + - - (-)					+ + (+)	+ +	(-) - -				
	-	+ 0 -	0 0 (-) + +					0 0 0	0 0	0 + +				
KMR	6.0	- (-) +	+ + + 0 0					- - -	- -	(+) + +				
	12.0	- (+) +	+ + (-) 0 0					- - -	- -	(+) + +				
	-	- (+) +	0 0 - - -					0 0 -	0 0	0 - -				

Tab. 12 : Versuch 2: Ergebnismuster

Prior- Regel	Uhr- zeit	Maschinen- gruppen	Aufträge fertig	Aufträge im System	Warte- schl.	Kosten
FCFS	6.0	(+) 0 (+)	- -	+ + (-)	+ +	0 0 (-)
	12.0	(-) + -	- - (+) - 0	+ - -	+ +	(-) - (-)
	18.0	- + -	- - + + +	- + (-)	+ +	0 - -
	0.0	- + -	- - + + +	+ + (-)	+ +	(-) - -
	6.0	- + -	- - + + +	+ + -	+ +	0 - -
	12.0	- + -	- - + + +	+ + (-)	+ +	0 - -
FIS	6.0	(-) (+) -	- - + 0 0	+ + (-)	- +	0 0 (-)
	12.0	(-) + -	+ + + + 0	- + -	- -	(-) - -
	18.0	(-) + -	+ + + + 0	- - -	- -	0 0 0
	0.0	(-) + -	+ + + + (-)	- - -	- -	(-) - -
	6.0	- + -	+ + + + (-)	- - -	- -	0 - -
	12.0	- + -	+ + + + (-)	- - -	- -	0 - -
LIS	6.0	0 + -	- - - 0 0	+ + (-)	- +	0 - -
	12.0	- + -	- - - - 0	+ + (-)	+ +	(-) - -
	18.0	- + -	- - - - (-)	+ + (-)	+ +	(-) - -
	0.0	- + -	- - - - -	+ + (-)	+ +	(-) - -
	6.0	- + -	- - - - -	+ + (-)	+ +	0 - -
	12.0	- + -	- - - - -	+ + 0	+ +	0 - -
KOZ	6.0	0 + -	+ + - 0 0	- - (+)	- +	0 - -
	12.0	(-) + -	+ + - - 0	- + 0	- -	(-) - -
	18.0	- + -	+ + - - (-)	- - 0	- -	0 - -
	0.0	- + -	+ + - - -	- - 0	- -	(-) - -
	6.0	- + -	+ + - - -	- - 0	- -	(-) - -
	12.0	- + -	+ + - - -	- - (+)	- -	0 - -
LOZ	6.0	+ - +	- - + 0 0	+ + 0	+ -	0 + +
	12.0	+ - +	- - + - 0	+ + (+)	+ +	0 + +
	18.0	+ - +	- + + + (+)	+ - +	+ -	0 + +
	0.0	+ - +	+ + + + 0	+ - +	+ -	0 + +
	6.0	+ - +	+ + + + +	- - (+)	(-) -	0 + +
	12.0	+ - +	+ + + + +	- - 0	- -	(+) + +
KFZ	6.0	(+) (+) -	+ + (-) 0 0	- - (+)	- -	0 (-) (-)
	12.0	(-) + -	+ + - - 0	- - (+)	- -	(-) - -
	18.0	+ + -	+ + - - (-)	- - (+)	- -	(-) - -
	0.0	+ + -	+ + - - -	- - (+)	- -	(-) - -
	6.0	0 + -	+ - - - -	- + -	- +	(-) - -
	12.0	(+) + -	+ - - - -	- + (-)	- +	0 - -
LFZ	6.0	(+) - +	- - + 0 0	+ + (+)	+ +	0 + +
	12.0	+ - +	+ + - - 0	- - +	+ -	0 + +
	18.0	+ - +	+ + - - (-)	- - +	- -	0 + +
	0.0	+ - +	+ + - - -	+ - (+)	+ -	0 + +
	6.0	+ - +	- + - - (-)	+ - (+)	+ -	(+) + +
	12.0	+ - +	- + - - -	+ - +	+ -	(+) + +

Tab. 13a : Versuch 6: Ergebnismuster

Prior. Regel	Uhr- zeit	Maschinen- gruppen	Aufträge fertig	Aufträge im System	Warte- schl.	Kosten
KRFZ	6.0	0 + -	+ + + 0 0	- - (+)	- -	0 - -
	12.0	(+) + -	+ + - - 0	- - (-)	- -	(-) - -
	18.0	+ + -	+ + - - (-)	- - (+)	- -	(-) - -
	0.0	+ + -	+ + - -	- - +	- -	(-) - -
	6.0	+ + -	+ + - -	- - +	- -	(-) - -
	12.0	+ 0 -	+ + - -	- - +	- -	0 - -
LRFZ	6.0	(+) - +	- - - - 0	+ + 0	+ +	0 + +
	12.0	0 - +	- - + - 0	+ + 0	+ +	0 + +
	18.0	0 - +	- - + - (-)	+ + 0	+ +	0 + +
	0.0	(+) - +	- - + -	+ + (+)	+ +	0 + +
	6.0	0 - +	- - + - +	+ + (+)	+ +	(+) + +
	12.0	0 - +	- - + - +	+ + +	+ +	(+) + 0
KURZ	6.0	(+) 0 +	- - 0 0 0	+ + +	+ +	0 (+) 0
	12.0	0 - +	- + + - 0	+ - +	+ -	0 + +
	18.0	(+) - +	+ + 0 + +	- - (+)	- -	0 + (+)
	0.0	+ - (-)	+ + - + +	+ - (+)	+ -	0 (+) 0
	6.0	+ - -	- + - + +	+ - (+)	- -	0 (-) (-)
	12.0	+ - -	- + - + (-)	+ - (+)	+ -	0 (-) (-)
KSZ	6.0	(+) (+) +	- - - - 0	+ + 0	+ +	0 (+) (+)
	12.0	(-) - +	+ - (+) - 0	- + (-)	- +	0 + +
	18.0	(-) - +	+ + (-) - (-)	- - -	- -	0 + +
	0.0	(+) - +	+ + - - -	- - -	- -	0 + +
	6.0	(+) - +	+ + 0 - -	- - -	- -	(+) + +
	12.0	+ - +	+ + + - -	- - -	- -	(+) + +
KAP	6.0	0 0 +	+ + (+) 0 0	- - (+)	+ -	0 + (+)
	12.0	(+) - +	+ + - - 0	- - +	+ -	0 + +
	18.0	+ - +	- + - - 0	+ - +	+ -	0 + +
	0.0	+ - +	+ + (+) + +	- - +	- -	0 + +
	6.0	(+) - +	+ + - - (-)	- - +	+ -	0 + +
	12.0	+ - +	+ + - - -	- - +	- -	(+) + +
KMR	6.0	(-) (+) +	- - - - 0	+ + (-)	+ +	0 (+) 0
	12.0	- (+) +	- + + - 0	+ + -	- -	0 (+) +
	18.0	- + +	- + + - (+)	+ - -	+ -	0 + +
	0.0	- + +	+ + + + +	+ + -	+ 0	0 + +
	6.0	- + +	+ + + + +	- - -	- -	0 + +
	12.0	- + +	+ + + + +	- - -	- -	0 + +

Tab. 13b : Versuch 6; Ergebnismuster

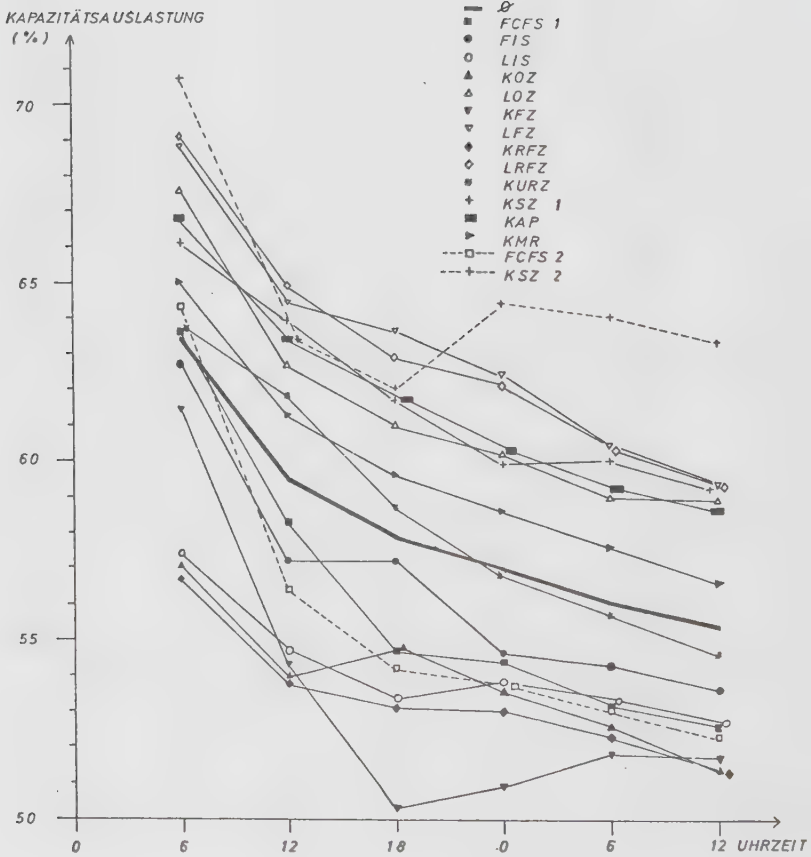


Abb. 5 : Versuch 6: Kapazitätsauslastung

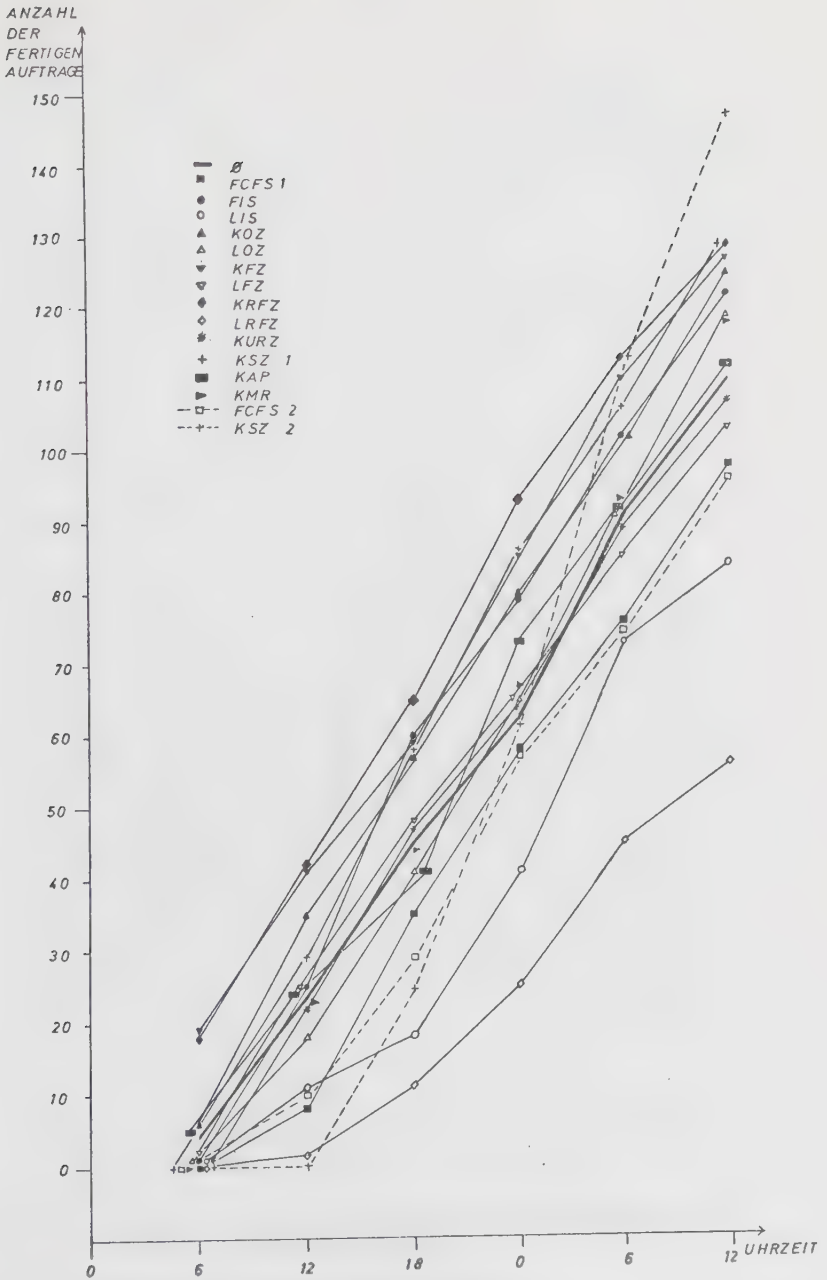


Abb. 6 : Versuch 6: Anzahl der fertigen Aufträge

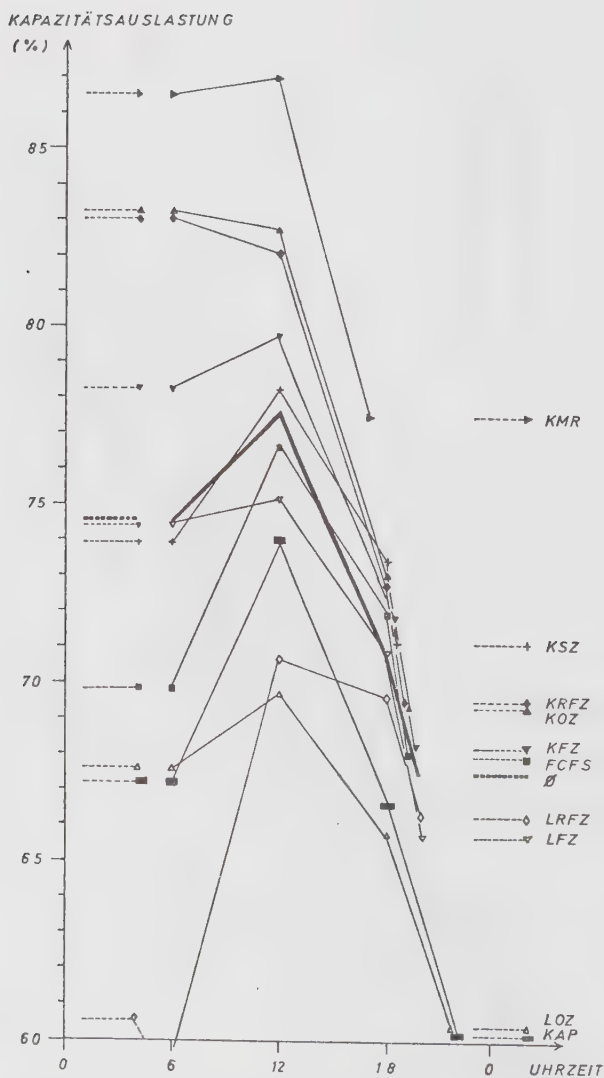


Abb. 7 : Versuch 2: Kapazitätsauslastung

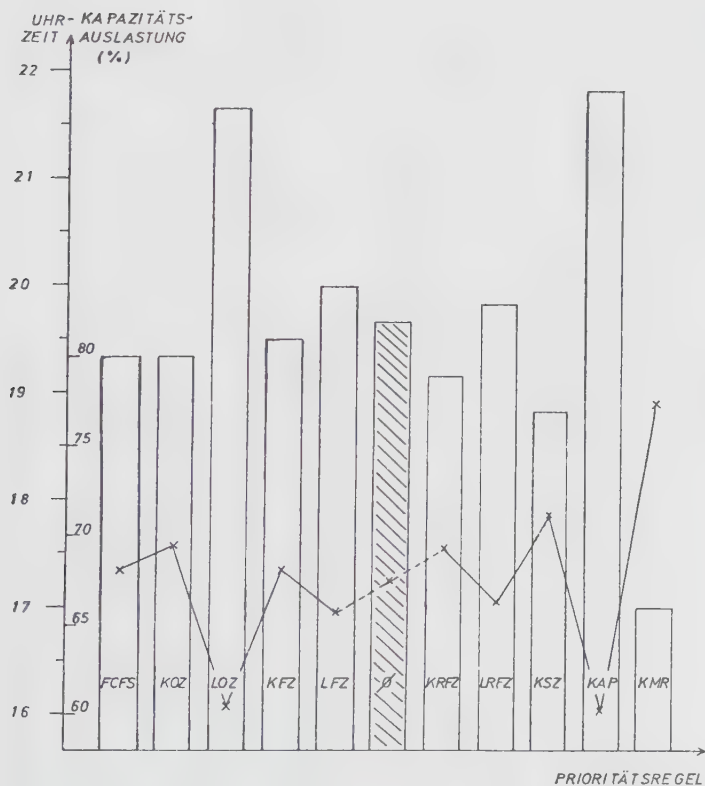


Abb. 8 : Versuch 2: Zusammenhang zwischen Kapazitätsauslastung —x—
und Fertigstellungszeit □

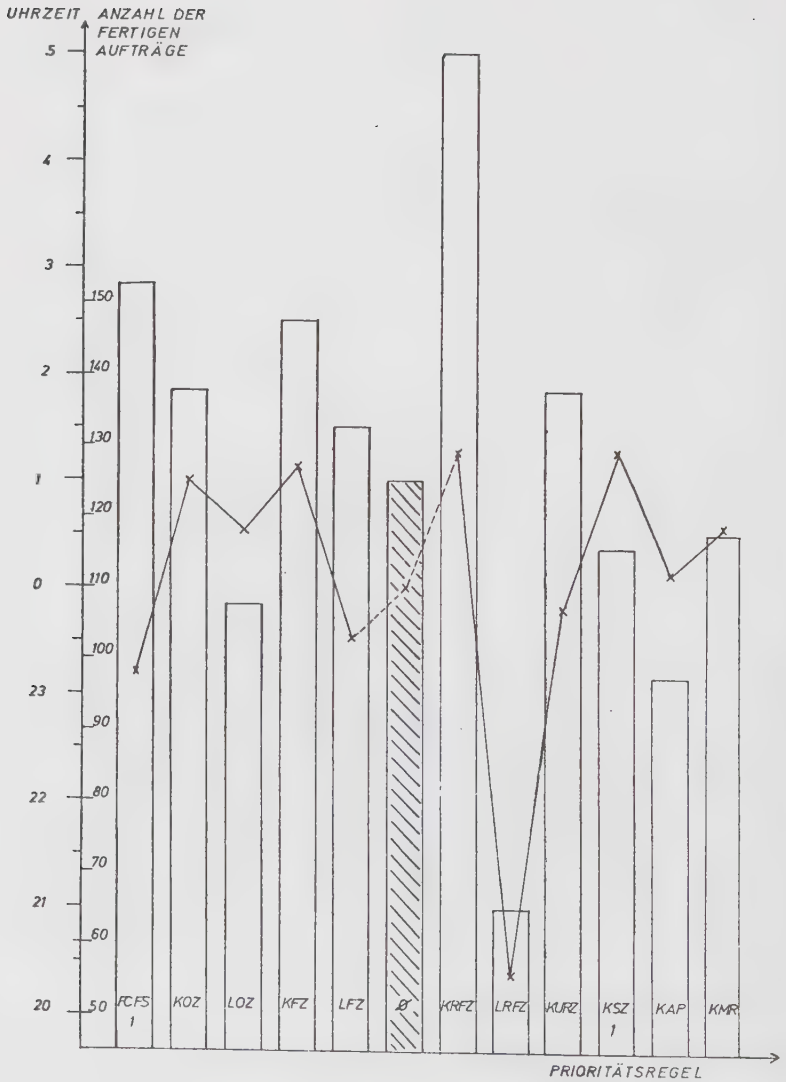


Abb. 9 : Zusammenhang zwischen der Fertigstellungsrate $\times$ in Versuch 6 und der Fertigstellungszeit $\square$ in Versuch 1

KAPAZITÄTSAUSLASTUNG
(%)

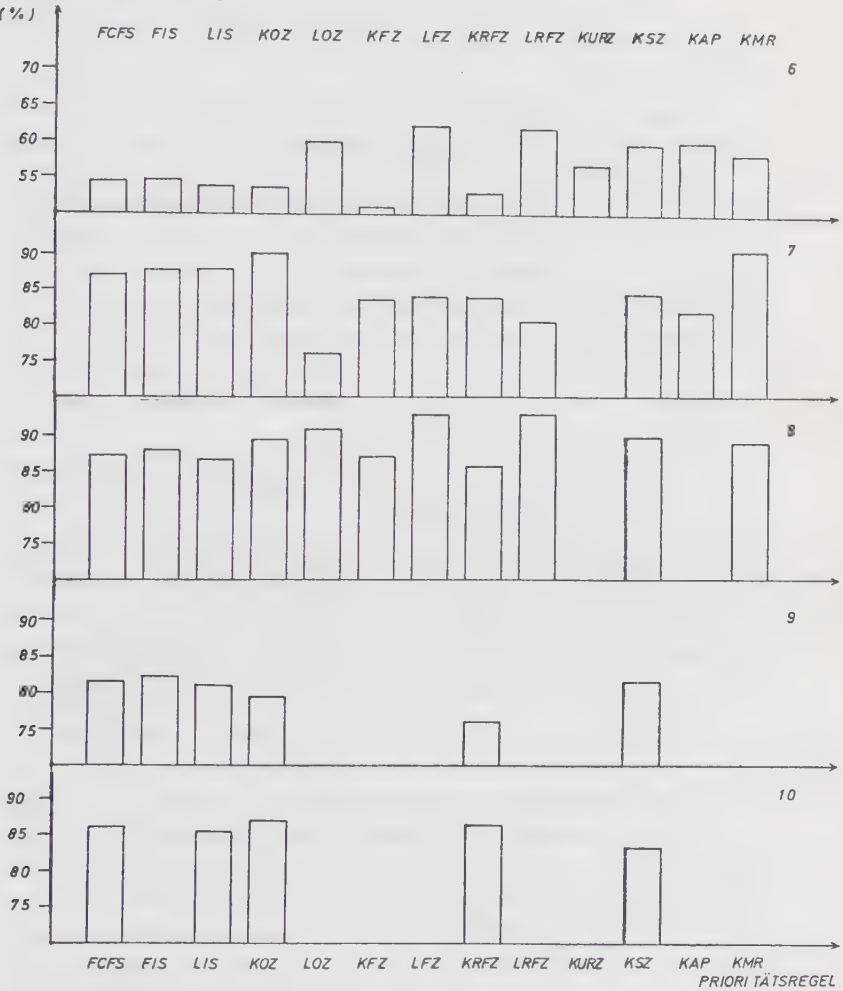


Abb. 10 : Versuch 6 - 10: Kapazitätsauslastung

6.2.1.4. Zusammenfassende Beurteilung der Simulationsergebnisse

Die Versuchsergebnisse lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten beurteilen:

- (1) Wirkung von Prioritätsregeln innerhalb der einzelnen Versuche,
- (2) Vergleich von Prioritätsregeln bei verschiedenen Ankunftsprozessen,
- (3) Einfluß von Zufallszahlenfolgen auf die Versuchsergebnisse,
- (4) Wirkungsweise der Vorrangregeln bei unterschiedlichen Produktionsbedingungen (Stammdaten),
- (5) Beobachtung der Ergebnisentwicklung im Zeitablauf,
- (6) Zusammenhang zwischen den einzelnen Ergebnissen (Mustererkennung).

Zu (1):

An dieser Stelle ist es nicht möglich, alle Einzelversuche zu kommentieren. Beispielhaft seien die in Abschnitt 6.1.2.3. enthaltenen Versuche herausgegriffen.

Betrachtet man bei Versuch 6 die Kapazitätsauslastung (vgl. Abb. 5), so liegen Vorrangregeln wie LRFZ, LFZ, LOZ und KSZ in der Spitzengruppe. Die KAP-Regel hat nur deshalb so günstig abgeschnitten, weil gemäß Stammdaten im allgemeinen Lose mit hoher Kapitalbindung auch gleichzeitig hohe Fertigungszeiten aufweisen.

Regeln wie KRFZ, KFZ und KOZ verhalten sich umgekehrt: Sie führen bei diesem Versuch zu schlechten Kapazitätsauslastungsgraden.

Diese Tatsachen scheinen auf den ersten Blick zahlreichen Forschungsergebnissen zu widersprechen. Dem 6. Versuch liegt jedoch eine Stammdatenkonstellation zugrunde, die relativ lange Umrüstzeiten in Verbindung mit einer hohen Varianz der Operationszeiten vorsieht.

Vergleicht man z. B. die Wirkungsweise von KOZ- und LOZ-Regel unter diesen Bedingungen, entfallen auf eine Planungsperiode bei der LOZ-Regel relativ wenige, bei der KOZ-Regel dagegen verhältnismäßig viele Rüst- und Bearbeitungsvorgänge. Da die Umrüstzeiten in die Maschinenleerzeit und damit in die Berechnung der Kapazitätsauslastung mit eingehen, muß sich eine LOZ-Regel naturgemäß positiv, eine KOZ-Regel negativ auf den Auslastungsgrad auswirken. Betrachtet man

jedoch lediglich die ablaufbedingten Leerzeiten (vgl. Tab. 11 bzw. 13), werden bisherige Forschungsergebnisse im wesentlichen bestätigt⁶²⁾.

Interessant ist das Einzelexperiment, bei dem die KSZ-Regel unter einer relativ knappen Terminalsituation getestet wurde (Soll-Durchlaufzeiten 20 Stunden für alle Produkte einheitlich). Aus der Darstellung ist ein deutliches Ansteigen der Kapazitätsauslastung kurz vor den Fertigstellungsterminen der zu Anfang blockweise eingeschleusten Aufträge zu erkennen.

Betrachtet man die Anzahl der bei diesem Versuch abgeschlossenen Aufträge (vgl. Abb. 6), sieht man, daß Regeln wie KRFZ, KFZ und KOZ die meisten Aufträge beenden, während sich umgekehrt Regeln wie LRFZ, LFZ und LOZ als ungünstig erweisen.

Lediglich die KSZ-Regel bewirkt sowohl eine hohe Kapazitätsauslastung als auch eine hohe Fertigstellungsrate. Dieser Trend kann sich durch knappere Terminsetzung noch verstärken.

Die Fertigstellungsrate von Aufträgen wurde insbesondere im Zusammenhang mit dem Planungssystem der Hughes Aircraft Company⁶³⁾ untersucht. Diese Studie zeigt ebenfalls, daß sich durch die Bevorzugung von Aufträgen mit kurzen Operationszeiten die größte Anzahl durch die Fertigung schleusen läßt.

Der Versuch 2 (vgl. Abb. 7) läuft unter anderen Bedingungen ab, da hier während der Simulation keine weiteren Aufträge herein-
genommen werden und deshalb die Kapazitätsauslastung gegen

62) vgl. Allen, M., a.a.O.;
Conway, R. W., Maxwell, W. L. und Miller, L. W., a.a.O.,
S. 219 ff.;
Hollier, R. H., a.a.O.;
LeGrande, E., a.a.O.

63) vgl. Bulkin, M. H., Colley, J. L. und Steinhoff jr., H. W.,
a.a.O.;
Le Grande, E., a.a.O.

Ende des Experiments absinkt. Auch die zugrundeliegenden Stammdaten unterscheiden sich von denen des 6. Versuchs. Die Kritische-Maschinenregel weist mit Abstand die höchste Kapazitätsauslastung auf. Außerdem liegen in diesem Fall Regeln wie KRFZ, KFZ und KOZ in der Spitzengruppe, während sich LRFZ, LFZ und LOZ nicht so günstig auswirken.

In Abb. 8 ist die mittlere Kapazitätsauslastung über der jeweiligen Fertigstellungszeit für alle Produkte aufgetragen. Darin zeigt sich deutlich, daß zwischen beiden Ergebnisgrößen annähernd ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang besteht.

Zu (2):

Abb. 9 soll den Zusammenhang zwischen der Anzahl abgeschlossener Aufträge in Versuch 6 und der Fertigstellungszeit in Versuch 1 (vgl. Abschnitt 8.7. im Anhang) verdeutlichen. Es ergibt sich der scheinbar paradoxe Zusammenhang, daß Vorrangregeln, die im Rahmen eines dynamischen Ankunftsprozesses zu einer hohen Fertigstellungsrate (Anzahl abgeschlossener Aufträge) führen, bei statischen Ankunftsprozessen kaum geeignet sind, ein Produktionsprogramm in einem vertretbaren Zeitraum fertigzustellen.

Diese Erkenntnis wird teilweise von Allen⁶⁴⁾ bestätigt, dessen Versuche sich allerdings nur auf ein Modell mit auslaufender Fertigung (statischer Ankunftsprozeß) gründen. Ein Vergleich mit entsprechenden Ergebnissen aus dynamischen Modellen ist deshalb unmöglich. Jedoch zeigt sich auch dort, daß die KOZ-Regel nur so lange günstige Resultate erbringt, wie die Kapazitätsauslastung durch Vorhandensein eines ausreichenden Auftragspolsters konstant bleibt.

⁶⁴⁾ vgl. Allen, M., a.a.O.

Zu (3):

Bei der FCFS-Regel findet die Reihenfolge, in der Aufträge in eine Warteschlange gelangen, naturgemäß am meisten Berücksichtigung. Deshalb wurde sie im Rahmen eines Einzelexperimentes zum Test mit einer anderen Zufallszahlenfolge herangezogen (Versuch 6, Abb. 5). Der Unterschied zwischen der Wirkungsweise beider Versionen (FCFS 1 und FCFS 2) war nach einer gewissen Anlaufphase so gering, daß weitere Versuche in dieser Richtung überflüssig waren.

Zu (4):

In Abb. 10 sind für jede Produktionsbedingung die je Prioritätsregel gewonnenen Kapazitäts-Auslastungsgrade aufgetragen. Alle Werte beziehen sich auf das Simulationsergebnis nach 24 Stunden.

Betrachtet man die absolute Höhe der Werte, so liegen diejenigen des 6. Versuchs erheblich niedriger als die Übrigen. Dies ist auf einen relativ hohen Anteil der Umrüstzeiten zurückzuführen, die in die Summe der Leerzeiten mit eingehen und so die Kapazitätsauslastung erheblich beeinflussen können.

Die wichtigste Erkenntnis, die aus diesem Vergleich gewonnen werden kann, besteht jedoch in der völlig unterschiedlichen Wirkungsweise der einzelnen Vorrangregeln je nach Wahl der zugrundeliegenden Produktionsbedingungen (z.B. führt die LOZ-Regel in Versuch 6 zu einer relativ hohen, in Versuch 7 zu einer geringen Kapazitätsauslastung; die KOZ-Regel verhält sich genau umgekehrt).

Zu (5):

Abb. 5 - 7 zeigen für fast alle Prioritätsregeln eine relativ kontinuierliche Entwicklung im Zeitablauf. Vorrangregeln, die von Anfang an eine im Vergleich zum Durchschnitt geringe Kapazitätsauslastung bzw. Fertigstellungsrate mit sich bringen, behalten diese Tendenz meist über den ganzen Simulationsablauf bei. Lediglich die KSZ-Regel bildet hierzu eine gewisse Ausnahme, da sie offenbar eine längere Anlaufphase als die übrigen Prioritätsregeln benötigt.

Zu (6):

Aus der bisherigen Diskussion der Versuche geht auch hervor, daß sich für bestimmte Produktionsbedingungen und bestimmte Ankunftsprozesse typische "Patterns" herausbilden, deren einzelne Elemente sich gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise waren kaum Ergebnisse zu erzielen, die eine gleichzeitige Minimierung ablaufbedingter und durch Umrüsten bedingter Leerzeiten mit sich brachten. Typisch ist auch der schon erwähnte Zusammenhang zwischen hohen Kapazitätsauslastungsgraden und kurzen Fertigstellungszeiten eines gesamten Produktionsprogramms bei statischen Ankunftsprozessen.

Bei dynamischen Ankunftsprozessen dagegen bedingten hohe Auslastungsgrade meist eine geringe Anzahl fertiger Aufträge und somit der Werkstatteleistung.

Die bisherigen Ausführungen lassen folgende Rückschlüsse zu:

- (1) Die Wirkungsweise von Prioritätsregeln auf bestimmte Zielgrößen wie Kapazitätsauslastung, Fertigstellungsrate usw. läßt sich nicht verallgemeinern, da sie stark von Parametern abhängt, die der Produktion zugrunde liegen. Daraus läßt sich auch die Vielzahl von Veröffentlichungen erklären, die z.T. widersprüchliche Erkenntnisse enthalten. Es ist auch nicht verwunderlich, weshalb in den zahlreichen Anwendungsfällen in der Praxis jeweils eigene Prioritätsregeln bzw. -kombinationen eingesetzt werden.

Diese Erfahrung führt auch dazu, Modelle wie das hier beschriebene zu schaffen, mit dessen Hilfe sich Praktiker oder Studenten ihre Prämissen selbst aufbauen und die gewonnenen Ergebnisse daran messen können.

- (2) Im allgemeinen erübrigen sich bei ausreichend großer Wahl des Simulationszeitraumes Versuche mit unterschiedlichen Zufallszahlenfolgen, da die dem Modell zugrundeliegenden stochastischen Einflüsse im Laufe der Zeit weitgehend ausgeglichen werden.
- (3) In einem On-line-Simulator ist es notwendig, daß sich innerhalb einer möglichst kurzen Simulationszeit repräsentative Ergebnisse erzielen lassen. Durch den relativ gleichförmigen

Ergebnisverlauf über die Simulationszeit hinweg ist diese Forderung erfüllt, und der Benutzer muß sich nur in seltenen Fällen mit Problemen des Simulationsumfanges befassen.

- (4) Es zeigt sich, daß zwischen einigen Ergebnissen (z.B. Kapazitätsauslastung und Fertigstellungsrate) deutliche Zusammenhänge existieren, so daß sich typische "Patterns" als Folge der Wahl einer bestimmten Strategie einstellen.

6.2.2. Lösung komplexer Entscheidungsprobleme

Das vorliegende Modell ist nicht nur dazu konzipiert, den Planer bei der Auswahl einfacher Prioritätsregeln zu unterstützen. Bereits die Anwendung kombinierter Prioritätsregeln erfordert Versuchsstrategien, die nicht mehr alle Faktorenkombinationen berücksichtigen können. Treten weitere Entscheidungsprobleme wie z.B. Personalzuordnung oder Maschineneinsatz hinzu, wird das Problem bereits so komplex, daß sich der Anwender nur noch auf einem relativ schmalen Pfad zu einer Lösung hin bewegen kann, von der er lediglich weiß, daß sie besser ist als die übrigen bisher gefundenen Ergebnisse.

Im folgenden soll diese Vorgehensweise anhand der Beispiele aufgezeigt werden, die in Abschnitt 2 zur Einführung in die Problemstellung der vorliegenden Arbeit dienen.

(1) Experimentfolge 1: Layoutplanung.

Der Benutzer testet zunächst verschiedene Kombinationen der LIS- und KSZ-Regel über einen Planungszeitraum von 12 Stunden. Tab. 14 zeigt die Reaktion des Modells auf folgende Parametereinstellungen:

1. Gleiche Gewichtung beider Kriterien
2. Doppelte Gewichtung der LIS- gegenüber der KSZ-Regel
3. Doppelte Gewichtung der KSZ- gegenüber der LIS-Regel
4. Dreifache Gewichtung der KSZ- gegenüber der LIS-Regel
5. Einfache KSZ-Regel
6. Umschalten von der LIS- auf die KSZ-Regel nach 6 Stunden
7. Umschalten von der KSZ- auf die LIS-Regel nach 6 Stunden

KAPAJ5 LAST5%	AUFTRG BEEVDT	MITTEL DLFZ	ANZAHL VERSPG	AUFTRG WERT	KOSTEN
82	24	7.67	0	226800	316111
82	24	6.44	0	226800	316278
81	25	7.20	0	236250	316138
81	22	7.56	0	207900	316224
81	21	7.37	0	198450	316311
82	25	7.22	0	236250	316325
80	25	7.32	0	236250	316136
81	23	7.23	0	224100	316217

Tab. 14: Layoutplanung: Versuchsreihe mit unverändertem Layout

Anschließend testet der Anwender dieselben Prioritätsregel-Kombinationen anhand eines verbesserten Layout (Tab. 15).

KAPAJ5 LAST5%	AUFTRG BEEVDT	MITTEL DLFZ	ANZAHL VERSPG	AUFTRG WERT	KOSTEN
80	34	4.35	0	321300	316450
82	33	4.61	0	311850	316619
81	34	6.08	0	321300	316514
81	31	6.42	0	292950	316499
82	34	7.08	0	321300	316668
83	34	5.11	0	321300	316556
82	34	5.10	0	321300	316696
81	33	5.33	0	315900	316571

Tab. 15: Layoutplanung: Versuchsreihe mit verbessertem Layout

- (2) Experimentfolge 2: Personalzuordnung in Verbindung mit Maschineneinsatz.

Ausgehend von einheitlich fünf Maschinen je Maschinengruppe werden zunächst Kombinationen der KURZ-, LOZ- und KSZ-Regel über einen Planungszeitraum von 12 Stunden durchgespielt. Die in Tab. 16 dargestellten Ergebnisse entsprechen folgenden Parametereinstellungen:

1. Gleiche Gewichtung der KURZ- und LOZ-Regel
2. Doppelte Gewichtung der LOZ- gegenüber der KURZ-Regel
3. Doppelte Gewichtung der KURZ- gegenüber der LOZ-Regel
4. Gleiche Gewichtung der KURZ-, LOZ- und KSZ-Regel
5. Umschalten von der einfachen KSZ-Regel auf die Kombination von KURZ- und LOZ-Regel (gleiche Gewichte) nach 6 Stunden
6. Umschalten von der Kombination aus KURZ- und LOZ-Regel (gleiche Gewichte) auf die KSZ-Regel nach 6 Stunden
7. Umschalten von der einfachen KSZ-Regel auf die Kombination von KURZ- und LOZ-Regel (gleiche Gewichte) nach 7 Stunden

KAPAZITÄT	AUFTRAG	MITTEL	ANZAHL	AUFTRAG	KOSTEN
LASTS%	BEENDT	DLFZ	VERSPG	WERT	
53	6	9.01	0	61155	219294
51	8	9.22	0	68715	219035
52	7	10.20	0	72330	219187
50	0	.00	0	0	219003
54	0	.00	0	0	219298
53	4	11.03	0	21120	219241
54	2	10.54	0	10560	219366
52	5	10.09	0	46776	219203

Tab. 16: Personalzuordnung in Verbindung mit Maschineneinsatz:
Versuchsreihe ohne Veränderung der Personalzuordnung
oder des Maschineneinsatzes

Damit hat sich der Benutzer Basiswerte geschaffen, von denen er bei weiteren Versuchen ausgehen kann.

Tab. 17 zeigt, wie sich die Ergebnisse nach einer Veränderung der Personalzuordnung (von Maschinengruppe 6 werden zwei Arbeiter abgezogen und der Maschinengruppe 3 zugeteilt) entwickeln. Zwar läßt sich damit keine höhere Kapazitätsauslastung erreichen, aber eine Alternative (7.) finden, die bei unverändert hoher Kapazitätsauslastung relativ viele Aufträge durchzuschleusen vermag.

KAPAZS LASTGZ	AUFTRG BEENDT	MITTEL DLFZ	ANZAHL VERSPG	AUFTRG WERT	KOSTEN
50	4	9.46	0	32910	219024
48	3	9.44	0	21735	218850
50	6	9.35	0	61155	219112
51	0	.00	0	0	219168
51	4	11.07	3	18240	219139
51	3	9.55	0	15840	219121
54	7	9.44	0	35520	219293
50	4	9.59	3	30900	219101

Tab. 17: Personalzuordnung in Verbindung mit Maschineneinsatz:
Versuchsreihe nach veränderter Personalzuordnung

In einer weiteren Versuchsreihe soll die Reaktion des Modells auf eine Veränderung des Maschineneinsatzes vorgeführt werden (Tab. 18). Diese erfolgt ausschließlich mit dem Ziel, die Kapazitätsauslastung zu verbessern. Dabei werden einige Maschinen von Maschinengruppen, die eine schlechte Kapazitätsauslastung aufweisen, außer Betrieb gesetzt. Eine dadurch indizierte geringfügige Verringerung der Fertigstellungsrate nimmt der Benutzer bewußt in Kauf.

KAPAZS LASTGZ	AUFTRG BEENDT	MITTEL DLFZ	ANZAHL VERSPG	AUFTRG WERT	KOSTEN
58	5	9.36	0	22800	219123
60	6	9.43	2	27350	219170
56	1	10.42	0	3780	218791
59	5	9.59	0	22020	219083
57	2	11.13	1	9840	218811
59	4	9.56	1	18240	218977
62	6	9.48	1	27360	219222
58	4	10.08	1	18771	219025

Tab. 18: Personalzuordnung in Verbindung mit Maschineneinsatz:
Versuchsreihe nach veränderter Personalzuordnung und
verändertem Maschineneinsatz

(3) Experimentfolge 3: Instandhaltungsplanung.

Der Planungszeitraum beträgt zunächst 12 Stunden. Maschinen-
gruppe 2 und 8 sind gemäß Systemparameter besonders störanfällig
und mit mittleren Laufzeiten von 10 Stunden versehen. Zur
ersten Versuchsreihe (Tab. 19) werden die FIS-, KAP- und
KOZ-Regel in folgenden Varianten herangezogen:

1. Gleiche Gewichtung der FIS- und KAP-Regel
2. Doppelte Gewichtung der FIS- gegenüber der KAP-Regel
3. Doppelte Gewichtung der KAP- gegenüber der FIS-Regel
4. Gleiche Gewichtung der FIS-, KAP- und KOZ-Regel
5. Doppelte Gewichtung der KOZ-Regel gegenüber den Übrigen
6. Einfache KOZ-Regel
7. Doppelte Gewichtung der KOZ- gegenüber der KAP-Regel
8. Dreifache Gewichtung der KOZ- gegenüber der KAP-Regel
9. Vierfache Gewichtung der KOZ- gegenüber der KAP-Regel
10. Fünffache Gewichtung der KOZ- gegenüber der KAP-Regel

KAP AUS LASTGZ	AUFTRG BEENDT	MITTEL DLFZ	ANZAHL VERSPG	AUFTRG WERT	KOSTEN
72	34	7.20	4	188770	198170
74	33	8.14	9	173871	198281
71	32	6.13	2	183330	198082
75	37	7.62	5	195770	198368
77	41	6.51	11	196320	198489
80	53	5.11	5	235800	198533
79	48	6.30	15	229040	198532
81	34	6.29	18	249140	198601
80	53	6.13	12	240940	198544
80	53	6.01	12	238640	198624

Tab. 19: Instandhaltungsplanung: Versuchsreihe ohne Einsatz
von Instandhaltungsmaßnahmen

Die Prioritätsregel soll nicht weiter verbessert, sondern
es sollen einige Instandhaltungstermine eingeführt werden.
Unter diesen neuen Bedingungen testet der Anwender nur noch
folgende Prioritätsregel-Kombinationen auf ihre Eignung
(Tab. 20):

1. Doppelte Gewichtung der K0Z- gegenüber der KAP-Regel
2. Dreifache Gewichtung der K0Z- gegenüber der KAP-Regel
3. Vierfache Gewichtung der K0Z- gegenüber der KAP-Regel

KAPAJ5 LAST3%	AUFTRG BEENDT	MITTEL DLFZ	ANZAHL VERSPG	AUFTRG WERT	KOSTEN
81	53	6.33	12	252070	198540
82	57	6.07	8	267570	198591
82	58	6.25	13	264740	198603

Tab. 20: Instandhaltungsplanung: Versuchsreihe unter Einsatz von Instandhaltungsmaßnahmen

Daraus wird deutlich, daß die Prioritätsregel unter den durch Instandhaltungsmaßnahmen geänderten Kapazitätsbedingungen modifiziert werden muß (in der neuen Situation ist ein Gewichtungsfaktor von 4 in die K0Z-Regel einzusetzen, um zur vergleichsweise besten Lösung zu gelangen).

Diese Beispiele zeigen, welche Möglichkeiten in der Anwendung des dargestellten Systems liegen, um komplexe Entscheidungsprobleme in der Produktionsplanung zu lösen. Folgende Punkte sind dabei zu beachten:

- (1) Es wäre - insbesondere vom Rechenaufwand her - unvertretbar, für jeden Entscheidungsbereich (z.B. Gewichtung einzelner Prioritätskriterien) durch umfangreiche Versuche ein Quasi-Optimum herzustellen. Vielmehr genügt es bereits, durch sinnvolle Variation der übrigen zur Verfügung stehenden Entscheidungsparameter weitaus günstigere Ergebnisse zu erzielen. Dies wurde anhand der drei ausgeführten Experimentfolgen gezeigt.
- (2) Es besteht die Möglichkeit, Einflußgrößen während des Simulationslaufes auf neue Werkstattbedingungen abzustimmen und dadurch bessere Ergebnisse zu erzielen (siehe Experimentreihe 1 und 2). Die Erfahrung mit dem System zeigt, daß sich ähnliche Effekte auch bei anderen Einflußgrößen (z.B. Maschineneinsatz) erreichen lassen.

- (3) Aus den Experimentreihen 2 und 3 ist zu ersehen, daß zwischen den einzelnen Einflußgrößen Wechselwirkungen bestehen können. Vergleicht man beispielsweise Tab. 16 und 18, stellt man fest, daß die Wirkungsweise der Prioritätsregeln je nach Kapazitätssituation unterschiedlich ist. Auch in der dritten Experimentfolge schuf der Einsatz von Instandhaltungsmaßnahmen eine veränderte Situation, die eine geringfügige Modifikation der Prioritätsregel erforderlich machte.

6.3. Wichtige Erkenntnisse aus dem Experimentverlauf

Die in Abschnitt 6.2. erläuterten Simulationsergebnisse sollen einen Eindruck davon vermitteln, welche Möglichkeiten sich aus dem Werkstatt-Simulations-System ergeben, wenn man seine On-line-Fähigkeit

- (1) zum Studium von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflußgrößen,
 - (2) zum Strategiewechsel während der Simulation und
 - (3) zum Aufbau möglichst günstiger Versuchsanordnungen
- ausnutzt.

Zu (1):

Zwar enthalten beispielsweise die Arbeiten von Baker/Dzielinski⁶⁵⁾ (Größe der Modellwerkstatt), von Conway u. a. und Gräßler⁶⁶⁾ (Fertigungsprinzipien), sowie von LeGrande und Carroll⁶⁷⁾ (Kapazitätsauslastung) Sensitivitätsanalysen, die sich mit dem Einfluß

⁶⁵⁾ vgl. Baker, C. T. und Dzielinsky, B. P., a.a.O.

⁶⁶⁾ vgl. Conway, R. W., Maxwell, W. L. und Miller, L. W., a.a.O., S. 219 ff.;
Gräßler, D., a.a.O.

⁶⁷⁾ vgl. LeGrande, E., a.a.O.;
Carroll, D. C., a.a.O.

der dem jeweiligen Modell zugrunde liegenden Daten auf die Wirkungsweise von Prioritätsregeln befassen. Das vorliegende System ist jedoch in der Lage, neben der Verdeutlichung dieser Zusammenhänge für jeden Benutzer auch weitere interessante und in der betriebswirtschaftlichen Literatur wenig gewürdigte Wechselwirkungen aufzuzeigen, wie sie sich z. B. beim kombinierten Einsatz von Maßnahmen der Personalzuordnung, des Kapazitätsausgleichs von Maschinengruppen und der vorbeugenden Instandhaltung herausstellen. Auf der anderen Seite lassen sich entsprechend dem zugrunde liegenden Zielsystem Ergebnisse formulieren, die sich aus mehreren Einzelwerten zusammensetzen. Werden zahlreiche Ziele gleichzeitig verfolgt, verlieren solche Resultate leicht an Übersichtlichkeit, und es empfiehlt sich, diese in Form einfacher Patterns darzustellen.

Zu (2):

Die Arbeit von Allen ⁶⁸⁾ bezieht sich auf einen im Zeitablauf kombinierten Einsatz des KOZ- und des LOZ-Kriteriums bei auslaufender Fertigung (statischer Ankunftsprozeß). Ansonsten bleibt die Frage nach dem zeitlich gestaffelten Einsatz von Prioritätsregeln - insbesondere auch bei dynamischen Ankunftsprozessen - von der Literatur unbeantwortet. Die vorliegenden Versuche enthalten - neben Experimenten mit einfachen und kombinierten Regeln - auch solche, die die Veränderung von Vorrangregeln im Zeitablauf einschließen, wodurch die Resultate erheblich verbessert werden konnten. Die Variationsmöglichkeit der Einflußgrößen im Zeitablauf beschränkt sich jedoch nicht nur auf den Bereich der Prioritätensteuerung. Beispielsweise erlaubt dieses Prinzip auch kapazitive Anpassungsmaßnahmen je nach der aktuellen Kapazitätsauslastung von Einzelmaschinen oder der gesamten Werkstatt und zeigt dadurch ebenfalls die Eignung des Simulationsmodells als Instrument zur Steuerung komplexer Werkstattabläufe.

68) vgl. Allen, M., a.a.O.

Zu (3):

Zahlreiche Untersuchungen befassen sich mit "intelligenten" Strategien zur dynamischen Faktorenauslegung bei Simulations-experimenten ⁶⁹⁾. Ihre Einsatzberechtigung liegt hauptsächlich bei "automatisch" ablaufenden Experimenten, also solchen, in denen der Mensch keine Eingriffsmöglichkeit besitzt. Außerdem sind solche Verfahren nicht geeignet, mehrere Zielkriterien gleichzeitig zu verfolgen.

In neuerer Zeit entstanden hierzu interaktive Lösungsansätze, bei denen z.B. der Mensch in Abhängigkeit der bisher gefundenen Ergebnisse marginale Substitutionsraten eingibt und dadurch die Gewichtung der Einzelziele innerhalb eines Zielgemischs für die nachfolgenden Simulationszyklen spezifiziert. Diese Verfahren wurden von Wallenius ⁷⁰⁾ einem kritischen Vergleich unterzogen. Die Gegenüberstellung solcher Strategien einerseits und einer einfachen "Trial-and-Error-Methode" andererseits ergab, daß letztere einem Vergleich mit komplizierteren Verfahren in vieler Hinsicht standhält.

Diesen Untersuchungen liegt jedoch ein relativ einfach aufgebautes Simulationsprogramm zugrunde, und es bleibt die Frage offen, welche Resultate sich aus einem ähnlich gearteten Vergleich anhand des vorliegenden Werkstatt-Simulations-Systems ergeben würden.

69) vgl. Mertens, P., Simulation, Stuttgart 1969, S.30 ff.; siehe auch die dort angegebene Literatur.

70) vgl. Wallenius, J., Comparative Evaluation of some Interactive Approaches to Multicriterion Optimization, Management Science 21(1975), S. 1387 ff.; siehe auch die dort angegebene Literatur.

7. Einbettung des Modells in das CET (Computerunterstütztes Entscheidungstraining)

Im Lehrangebot für Betriebliche Datenverarbeitung am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Betriebs- und Wirtschaftsinformatik, der Universität Erlangen-Nürnberg ist die Veranstaltung "Simulation und CET" fester Bestandteil und ihr Besuch für jeden Studenten der Datenverarbeitung verbindlich.

Bereits im Sommersemester 1973 wurde eine einfache Version des "Werkstatt-Simulators" für den Lehrbetrieb installiert. Laufende Kritiken und Verbesserungsvorschläge von Studenten halfen mit, das System zu dem hier beschriebenen auszubauen.

Das Teachware-Paket des CET besteht derzeit aus 12 Dialogmodellen. Von seiten der Projektgruppe CUU an der Universität Gießen sind Bestrebungen im Gange, Teile davon in das dortige CUU-Programm einzugliedern. Auch andere Universitäten sowie Institutionen der beruflichen Aus- und Weiterbildung haben bereits Interesse an einer Übernahme gezeigt.

7.1. Grundgedanken des CET ⁷¹⁾

Das Hauptziel des CET besteht darin, den Benutzer auf Entscheidungssituationen, mit denen er sich in der Praxis konfrontiert sieht, vorzubereiten.

Der Rechner erledigt dabei in der Hauptsache Aufgaben, für die er sich besser eignet als der Mensch: er nimmt umfangreiche Berechnungen vor und entlastet den Lernenden von Routinetätigkeiten, die für seinen Lernfortschritt von untergeordneter Bedeutung sind.

So ist es möglich, dem Benutzer relativ komplexe, der Praxis angenäherte Modelle zur Verfügung zu stellen. Dies ist insbesondere für den Praktiker notwendig, der in den Reaktionen des Modells meist ein Abbild der betrieblichen Abläufe sieht, die ihm aufgrund seiner Erfahrung bekannt sind.

⁷¹⁾ vgl. Österle, H., Das Computerunterstützte Entscheidungstraining - Konzept, Experimente und Anforderungsprofil, Diss. Nürnberg 1973

7.2. Fallstudien

Um den Studenten eine sinnvolle Arbeitsweise mit dem Modell zu ermöglichen, wurden einige praxisnahe Fälle konstruiert und mit Hinweisen versehen, wie bei der Lösung des Problems vorzugehen ist. Folgende Fallstudien stehen zur Verfügung:

- (1) Es sei ein Betrieb der Kleinserienfertigung angenommen, bei dem die Produkte einen Fertigungsfluß mit ähnlichem Richtungssinn aufweisen.
- Versuchen Sie zunächst, mit Hilfe von kurzfristig durchführbaren Maßnahmen die Wirtschaftlichkeit der Produktion zu erhöhen!
 - Nehmen Sie an, Sie hätten während einer durch Kurzarbeit bedingten Produktionsunterbrechung die Möglichkeit, die Maschinengruppen anders anzuordnen. Versuchen Sie mit Hilfe des WSS, ein für den Produktionsfluß günstiges Layout herauszufinden!
 - Überprüfen Sie, ob das unter dem relativ ungünstigen Layout gefundene "Optimum" auch für Ihre neue Maschinenanordnung Gültigkeit hat oder ob sich hierzu eine andere Dispositionsvorschrift eignet!

Geeignete Stammdatensätze: 3333, 4444, 5555

Planungszeitraum: 12 Stunden

- (2) In einem Betrieb der Einzelfertigung wird eine bestimmte Maschinengruppe sehr stark beansprucht und somit zur Engpaßmaschine.
- Suchen Sie zunächst eine geeignete Prioritätsregel, die imstande ist, Umrüstzeiten, die an dieser Maschinengruppe auftreten, zu reduzieren!
 - Versuchen Sie, mit Hilfe geeigneter Maßnahmen der Personalzuordnung (Personal sei nur für Rüst-, nicht für Bearbeitungsvorgänge zuständig) einen möglichst gleichmäßigen Produktionsfluß herbeizuführen!
 - Erhöhen Sie die Kapazitätsauslastung außerdem durch Maßnahmen des Maschineneinsatzes! Setzen Sie sich zuvor jedoch ein Mindestsoll von abgeschlossenen Aufträgen, das nicht unterschritten werden darf!

- Stellen Sie fest, ob die zu Anfang gefundene Prioritätsregel unter den von Ihnen neu geschaffenen Bedingungen immer noch ein "Optimum" darstellt!

Geeignete Stammdatensätze: 1111, 2222

Planungszeitraum: 12 Stunden

- (3) Die besonders ausgeprägte Störanfälligkeit einzelner Maschinengruppen führt zu langen Wartezeiten der Aufträge an den betreffenden Stationen.

- Kurzfristig besteht nicht die Möglichkeit, die Maschinen planmäßig zu warten. Sie müssen also mit anderen Maßnahmen versuchen, die relativ hohe Kapitalbindung in der Fertigung zu reduzieren!
- Überprüfen Sie, welche Möglichkeiten sich durch die Einführung von planmäßigen Wartungsmaßnahmen in möglichst günstigen Zeitabständen ergeben hätten!
- Die ursprünglich gewonnenen Dispositionsvorschriften sind aufgrund der neuen Kapazitätssituation - falls notwendig - zu revidieren!

Geeignete Stammdatensätze: Grundsätzlich alle, insbesondere 2222

Planungszeitraum: 18 Stunden

7.3. Praktische Erfahrungen mit Benutzern des Systems

Nach bisherigen Beobachtungen ergaben sich zwei Möglichkeiten, das Modell zur Ausbildung von Studenten einzusetzen:

- (1) Vorführung im Rahmen einer Lehrveranstaltung
- (2) Anwendung außerhalb des regulären Lehrveranstaltungsprogramms

Zu (1):

Insgesamt hatten ca. 50 Studenten die Gelegenheit, das System kennenzulernen. Üblicherweise wurden Gruppen zu je 2 Benutzern gebildet. Dies erwies sich als vorteilhaft, da so Probleme in gemeinsamer Diskussion bearbeitet werden konnten. Im Durchschnitt stand etwa eine Stunde für eine Dialogsitzung zur Verfügung. Es stellte sich heraus, daß diese Zeitspanne geradezu dazu ausreichte, um die Benutzer mit den vielfältigen Möglichkeiten

des Systems vertraut zu machen. Meist wählten die Studenten ihnen bereits aus der Literatur bekannte Problemkreise, wie die Anwendung einfacher Prioritätsregeln.

Zu (2):

Außerhalb des regulären Lehrveranstaltungsprogramms stand mehr Zeit für umfangreiche Testarbeiten zur Verfügung.

Studenten, die das Modell bereits aus der Lehrveranstaltung kannten, wurden als Testpersonen eingesetzt, um herauszufinden, wie sich "erfahrene" Benutzer dem System gegenüber verhalten und welche Lerneffekte sich damit erzielen lassen ⁷²⁾.

72) Alle in diesem und den folgenden Abschnitten beschriebenen Erfahrungen sind eine Zusammenfassung handschriftlicher Protokolle, die vom Systembetreuer während der Dialogsitzungen geführt wurden. Wichtige Erkenntnisse entstammen auch den zahlreichen Diskussionen mit den einzelnen Gruppen.

Eine solche Vorgehensweise erschien gegenüber Fragebogenaktionen deshalb vorteilhaft, weil

- (1) nur durch persönliche Beobachtung der Anwender in allen Stadien ihres Dialogs ein vollständiges Bild des Benutzerverhaltens zu bekommen ist,
- (2) sich durch Diskussionen oft Aspekte ergeben, die vom Systembetreuer selbst nicht bedacht wurden und somit nicht in den Fragenkatalog einer schriftlichen Befragung Eingang finden konnten,
- (3) durch laufende Verbesserung des Systems Benutzer jeweils mit verschiedenen Versionen arbeiteten und deshalb die Fragenkataloge jeweils hätten angepaßt werden müssen.

7.3.1. Handhabung des Systems

Je nach der Menge der gesammelten Erfahrungen eines Benutzers kann er mit dem Modell in verschiedener Weise umgehen:

- (1) Dialogfortschritt mit Hilfe der einfachen numerischen Steuerung,
- (2) Anwendung von alphanumerischen Befehlen entsprechend der Kommandoliste,
- (3) zusätzliche Verwendung der On-line-Generierung,
- (4) Einsatz der Off-line-Generierung,
- (5) Aufbau von "individuellen" Stammdatensätzen für spezifische Benutzerprobleme.

Zu (1):

Der Anwender, der zum ersten Mal mit dem System in Berührung kommt, muß mit Hilfe ausführlicher Texte laufend über den aktuellen Stand des Dialogs, das zur Debatte stehende Entscheidungsproblem und den Inhalt von Ereignissen informiert werden. Hinzu kommen Anweisungen zur richtigen Eingabe von Parametern. Um einen hohen Betreuungsaufwand für Anfänger zu vermeiden, ist der aus der numerischen Steuerung sich ergebende Dialog so verfaßt, daß er - Sachkenntnis aus der Industriebetriebslehre vorausgesetzt - ohne zusätzliche Hinweise verstanden werden kann.

Das folgende Dialogbeispiel zeigt, welche Bildmasken durchlaufen werden müssen, um von der ersten Entscheidungsebene ab zum neuen Auftragsbericht und wieder zurück zu gelangen:

Zu (2):

Während der Arbeit mit dem System lernt der Anwender mit der Zeit bestimmte Standardabläufe im Dialogfortschritt auswendig, und es hat sich gezeigt, daß der "erfahrene" Benutzer die Texte der einzelnen Masken nur noch selten liest, sondern sich bestimmte Schlüsselwörter, die ihm den aktuellen Stand des Dialogs signalisieren, merkt und sie ggf. wiedererkennt. Es kommt dann zu dem viel beobachteten Effekt, daß Texte oder ganze Bilderfolgen "Überblättert" werden, um möglichst schnell zur gewünschten Ergebnispräsentation zu gelangen.

In diesem Fall kann mit der zur Verfügung stehenden Kommando-steuerung gearbeitet werden, mit deren Hilfe aus fast jeder Dialogphase heraus an bestimmte andere Dialogstützpunkte gesprungen werden kann. Mit Hilfe der Kommandosteuerung würde der in (1) dargestellte Dialogteil folgendermaßen ablaufen:

```

*****
*
*ENTSCHEIDUNGSEBENE 1
*=====
*BITTE ENTSCHEIDEN SIE SICH, OB SIE DIE WERTE
*
* (1) AUFTRAGSVERTEILUNG
* (2) ANZAHL INSTALLIERTER MASCHINEN
* (3) PERSONALBESTAND
* (4) ANORDNUNG VON MASCHINGRUPPEN
* (5) KAPAZITÄT DER ZWISCHENLAGER
* (6) SOLL-DURCHLAUFZEITEN (TERMINFIXIERUNG)
*
* VERAENDERN WOLLEN ODER
*
* (7) DEREN BISHERRIGE EINSTELLUNG
*     BEIBEHALTEN WOLLEN.
*
*
* DANN BITTE SEND
*****

*****
*
*          DATUM UHRZEIT
*WARTESCHLANGEN-BERICHT          9      2.00
*=====
*          MAXIMALE BELEGUNG (KAPAZITÄT) HOECHST-
*          BELEGUNG AKTUELL          GRENZE
*=====
*VOR MAGRP 11      15      14  75400      100
*VOR MAGRP 21      9       8  42400      100
*VOR MAGRP 31      17      14  73800      100
*VOR MAGRP 41      8       8  43900      100
*VOR MAGRP 51      4       0    0         100
*VOR MAGRP 61      7       5  30640      100
*VOR MAGRP 71      4       0    0         100
*VOR MAGRP 81      10      7  59000      100
*VOR MAGRP 91      7       0    0         100
*=====
*SUMME      1      --      56  325760      ---
*=====
*EINGABE (1)-(9): EINZELERGEBNISSE MAGRP 1-9
*EINGABE (10) : WEITER IM PROGRAMM
*****

```

Zu (3):

Der Durchschnittsbenutzer wäre überfordert, wenn er zusätzlich zu der Vielzahl von Entscheidungsvariablen, die ihm angeboten werden, auch die Systemparameter variieren könnte. Deshalb kann er die Phase der Systemgenerierung weder durch die numerische noch durch die einfache Kommandosteuerung einleiten. Hierzu ist vielmehr die kombinierte Eingabe von zwei "BEGINN"-Befehlen notwendig, wodurch dieser Bereich vor der Anwendung durch die meisten Benutzer geschützt ist.

Beobachtungen mit Anwendern, die bereits reichhaltige Erfahrungen mit dem System gesammelt hatten, zeigten insbesondere folgende Vorteile dieser Art der Systemgenerierung:

- sie erlaubt die Konstruktion verschiedener Ankunftsprozesse am Bildschirm (vgl. auch Abschnitt 3.2.1.1.),
- je nach der Konstellation von Stammdaten und gewählter Strategie ist auf Wunsch die Herstellung stationärer Zustände (Ankunftsrate $\approx$ Abfertigungsrate) im Simulationsablauf möglich (vgl. hierzu Ausführungen in Abschnitt 6.1.),
- gleiche Strategien bzw. deren Kombinationen können anhand verschiedener Zufallszahlenfolgen getestet werden.

Zusätzlich ergab sich folgender reizvoller Nebeneffekt:

Durch Rückkopplung mit der Systemgenerierungsphase lassen sich beliebige Strategien zur Einschleusung von Aufträgen in die Werkstatt durchspielen, z.B.:

- Aufträge werden nicht einzeln, sondern blockweise in die Fertigung hereingenommen, wobei sowohl die Blockgröße (Anzahl neuer Aufträge) als auch die Zeitintervalle entsprechend dem momentanen Füllungsgrad der Werkstatt variiert werden können. (Dies geschieht durch einfaches Hochsetzen der zuvor gewählten Auftragszahl um die gewünschten zusätzlich einzuschleusenden Aufträge und Wiederaufsetzen auf den bisherigen Simulationsstatus.)

Zu (4):

Die für den Benutzer geschaffene Wahlfreiheit bringt jedoch in folgenden Fällen erhebliche Nachteile mit sich:

In häufig wiederkehrenden - durch Pausen unterbrochenen - Dialogsitzungen starteten die Anwender Simulationsläufe, die sich auf ähnliche Basiswerte gründeten. Die jeweils erneute Eingabe aller Parameter zur On-line-Systemgenerierung und zu den einzelnen Entscheidungsebenen war sehr mühsam und kostete viel Zeit. Außerdem bestand so die Gefahr, daß bei erneuten Sitzungen infolge einer versehentlich falschen Wahl der Basiswerte Simulationsergebnisse nicht mehr vergleichbar und damit ganze Versuchsreihen wertlos waren.

Deshalb erhielten Studenten, die auf diesem hohen Benutzer-niveau arbeiteten, jeweils eigene Lochkartenpakete zum Zweck der Off-line-Systemgenerierung.

Zu (5):

Die 5 Stammdatensätze, die dem System zugrunde liegen, können bei weitem nicht das Spektrum möglicher Betriebsmittel- bzw. Fertigungsvorschriftenstrukturen abdecken. Deshalb wäre es denkbar, daß insbesondere praxisorientierte Anwender in Zukunft den vorhandenen weitere Stammdatensätze hinzufügen werden.

7.3.2. Benutzer in besonderen Entscheidungssituationen

Generell war zu beobachten, daß sich die Benutzer in bestimmten Entscheidungssituationen ähnlich verhielten. Der folgende Abschnitt soll solche typischen Verhaltensmuster aufzeigen:

(1) Layout.

Für die meisten Benutzer war das hauptsächliche Gütekriterium für eine Layoutentscheidung die mittlere Übergangszeit aller Aufträge, wobei sie sich deren Minimierung zum Ziel setzten.

Dieses Kriterium verhält sich jedoch unabhängig von der Anzahl abgefertigter Aufträge je Auftragsklasse. Deshalb ist

es meist wichtiger, solche Entscheidungen an Kriterien wie Kapazitätsauslastung, Ausbringungsmenge usw. zu orientieren und dabei die Übergangshäufigkeiten als Planungshilfe heranzuziehen. Dies gilt insbesondere für die Fälle, in denen ungleichmäßige Auftragsprofile vorliegen und Produkte unterschiedlichen Prioritäten unterliegen.

(2) Kapazität von Maschinengruppen.

Die Anzahl installierter Maschinen je Maschinengruppe wurde zunächst von den Anwendern relativ großzügig festgelegt, um in der zweiten Entscheidungsebene beim Maschineneinsatz relativ flexibel zu bleiben. Hatte der Benutzer ein günstiges Ergebnis gefunden, schraubte er seine Maschinenkapazität auf die Anzahl der eingesetzten Maschinen zurück, um so Fixkosten einzusparen und seinen Bereichserfolg zu verbessern.

(3) Kapazität von Zwischenlagern.

Bei der Dimensionierung der Kapazität der Zwischenlager wurde im wesentlichen nach zwei Prinzipien vorgegangen:

- Ein Teil der Testpersonen steckte grundsätzlich die Obergrenze so hoch, daß Simulationsunterbrechungen infolge zu geringer Kapazität nicht zu befürchten waren.
- Eine andere Gruppe erkannte, daß Simulationsläufe mit stark unterschiedlichen Warteschlangenlängen meist schlechte Ergebnisse hervorbrachten. Sie verwendeten die Parameter deshalb zur Einschränkung des Simulationsumfanges, indem sie diese relativ niedrig ansetzten und ggf. im Anschluß an eine Simulationsunterbrechung nach einer besseren Strategie suchten.

(4) Personalbestand insgesamt in der Werkstatt.

Für den Anwender erwies es sich als schwierig, die zahlreichen Gesichtspunkte, die es bei dieser Entscheidung zu beachten galt, zu berücksichtigen:

- Minimierung der Personalkosten
- Minimierung der Umrüstkosten und -zeiten
- Abstimmung der Gesamtzahl des Personals auf die Anzahl der tatsächlich eingesetzten Maschinen (im Entscheidungszeitpunkt oft noch unbekannt)

In den meisten Fällen wurde die Personalanzahl der Anzahl installierter Maschinen angepaßt. Wurden später weniger Maschinen eingesetzt als vorhanden, entstanden naturgemäß personelle Überkapazitäten.

(5) Auftragszusammensetzung.

Diese Parameter wurden zumeist in der Weise festgesetzt, daß sich für alle Auftragsklassen gleiche Ankunfts waarschijnlijkkeiten ergeben.

Nur eine Gruppe versuchte, durch extreme Gewichtung einer einzigen Auftragsklasse einer Fließfertigung ähnliche Zustände herzustellen. Durch exakt auf die Länge der einzelnen Arbeitsgänge abgestimmte Maschinenkapazitäten brachte sie es fertig, die Stauungen auf ein Minimum zu beschränken.

(6) Soll-Durchlaufzeiten.

Auf die Terminsetzung wollten die Benutzer meist selbst Einfluß nehmen. Um einen groben Begriff von der richtigen Bemessung der Soll-Durchlaufzeiten zu erhalten, wählten sie zwar zunächst die Alternative, die ihre rechnerische Ermittlung aus den Fertigungszeiten ermöglicht. In einem zweiten Schritt legten sie sie selbst fest, wobei sie die rechnerisch ermittelten Werte als Richtgröße verwandten.

(7) Losgrößen.

Losgrößenvariationen erfolgten meist in der Weise, daß die bisher festgelegten Werte um bestimmte Faktoren gesenkt oder angehoben wurden.

Die Studenten zeigten sich immer wieder erstaunt über drei Reaktionsweisen des Modells:

Im Verhältnis zur Parametervariation

- stark veränderte Kapazitätsauslastung,
- stark veränderte Anzahl beendeter Aufträge,
- stark veränderte Anzahl von Aufträgen im System.

Daran kann jedoch sehr einfach demonstriert werden, daß z.B. bei einer Verdoppelung der Losgröße

- die Kapazitätsauslastung der Maschinengruppen infolge geringerer Umrüstzeiten steigt,
- die Anzahl fertiger Aufträge naturgemäß geringer sein muß, da ja höhere Stückzahlen hergestellt werden (in diesem Fall kann nur der Wert der abgeschlossenen Aufträge bzw. deren Stückzahl als Vergleichsgrundlage herangezogen werden),
- die Zwischenankunftszeiten im Durchschnitt ebenfalls verdoppelt werden, da das Modell von konstanten Anforderungen an die Werkstatt ausgeht.

(8) Bearbeitungsreihenfolgen.

Nur wenige Studenten bewiesen genug Praxisverständnis, um zu erkennen, daß in diesem Entscheidungsbereich nur die Möglichkeit liegen kann, einzelne Maschinengruppen im Rahmen zulässiger Arbeitsplanvarianten gegeneinander zu vertauschen. Die meisten stellten - was meist praxisfremd ist - die gesamte Maschinenfolge um und erzielten so tatsächlich oft bessere Ergebnisse als zuvor.

Jedoch ließen sich auch bei richtiger Anwendung dieses Teils durchaus günstige Ergebnisse in den Fällen erzielen, in denen durch unglückliche Arbeitsgangfolgen mehrerer Auftragsklassen zeitweise lange Stauungen vor bestimmten Maschinengruppen vorkamen. Insbesondere konnten dann die Ergebnisse deutlich verbessert werden, wenn die Maschinengruppen keinen "geplanten" Engpaß mit hohen durchschnittlichen Bearbeitungszeiten (Über alle dort bearbeiteten Aufträge) darstellten, sondern wenn lediglich "zufallsbedingte" Warteschlangen erhebliche Stockungen im Produktionsfluß verursachten.

(9) Maschineneinsatz.

Zur Feststellung von Engpässen in der Produktion wurde meist der Warteschlangen-Bericht herangezogen. Die Reaktionen der Benutzer auf besonders lange Stauungen vor bestimmten Maschinengruppen lagen meist in der gezielten Veränderung der Kapazitätsquerschnitte von Maschinengruppen, erwiesen sich jedoch oft als falsch bzw. nicht wirksam genug:

- Es wurde nicht bedacht, daß keine zusätzliche Kapazität mehr zur Verfügung stand.
- Man versäumte es, durch exakte Beobachtung der betreffenden Warteschlange im Zeitablauf festzustellen, ob diese nicht ohnehin schon im Abbau begriffen war und deshalb eine Kapazitätserweiterung unnötig gewesen wäre.
- Die Anwender hatten vergessen, daß durch die Erweiterung der Kapazität zusätzliche Rüstzeiten auftraten und sich deshalb die Produktion nicht in erwartetem Maße beschleunigen ließ.
- Meist wurde die Maschinenkapazität zu stark erweitert, und die Benutzer fragten sich, weshalb danach an anderen Stellen neue Engpässe entstanden (dies ist darauf zurückzuführen, daß bei gleicher Kapazität der übrigen Maschinengruppen die am Engpaß schneller abgefertigten Aufträge Stauungen vor den bisher wenig belasteten Betriebsmitteln verursachen).
- Die Reaktion des Modells ist oft erst nach einigen Stunden Simulationszeit deutlich zu erkennen.
- Durch Maßnahmen der Kapazitätserweiterung läßt sich nur die Produktionsgeschwindigkeit, nicht aber z.B. die Kapazitätsauslastung erhöhen.
- Nur in den durch Fallstudien unterstützten Sitzungen dachte man daran, Kapazitätsquerschnitte bei solchen Betriebsmitteln zu verringern, die laut Warteschlangen-Bericht eine geringe Belastung aufwiesen. Wenn auch die Produktionsgeschwindigkeit durch solche Maßnahmen etwas verringert wurde, ließen sich damit doch erheblich höhere Kapazitätsauslastungsgrade erzielen.

(10) Maßnahmen zur vorbeugenden Instandhaltung.

Um den Benutzer nicht zu verwirren, wurden die Systemparameter so gesetzt, daß nur bestimmte Maschinengruppen besonders störanfällig waren und dort keine planmäßigen Instandhaltungen durchgeführt wurden.

Die Anwender erkannten relativ schnell, daß sich die Zufallsausfälle durch Einsetzen eines geeigneten Instandhaltungsintervalles reduzieren ließen. Insbesondere erwies es sich als didaktisch vorteilhaft, daß innerhalb dieses Modells die Vorteile einer Instandhaltungsaktion auf Zielgrößen wie z.B. Kapazitätsauslastung, Anzahl abgeschlossener Aufträge und Terminverspätungen abzulesen waren. Diese treten nämlich in der hier präsentierten Form in den meisten Instandhaltungsmodellen nicht in Erscheinung.

Die Tatsache, daß sich Instandhaltungsintervalle und Zufallsausfälle auf die Lastlaufzeiten der Maschinen bezogen, stieß bei den Studenten immer wieder auf Unverständnis. Gaben sie z.B. Instandhaltungsintervalle in Höhe von 10 Stunden an, war es durchaus möglich, daß - je nach Kapazitätsauslastung - die erste planmäßige Instandhaltungsaktion erst nach ca. 20 Stunden erfolgte.

(11) Personalbestand und -zuordnung.

Ähnlich wie beim Maschineneinsatz handelt es sich dabei um Maßnahmen der gezielten Dimensionierung von Kapazitätsquerschnitten. Zahlreiche Entscheidungen der Anwender erwiesen sich auch hier als falsch oder nicht wirksam genug, und oft war zu erkennen, daß an diesen Entscheidungsbereich falsche Erwartungen geknüpft wurden:

- Die Benutzer beachteten nicht, daß bei kurzfristig angesetzten Dispositionen der gesamte Personalbestand gleich bleiben muß.

- Oft wurden mehr Arbeiter pro Maschinengruppe eingesetzt als Maschinen im Einsatz waren (dies hat die Konsequenz, daß das zuviel eingesetzte Personal keinen Beitrag zur Verkürzung der Rüstzeiten mehr leistet).
- Die Anwender variierten die Parameter zu stark, indem sie von leeren Maschinengruppen zuviel Personal abzogen und stark belasteten Maschinengruppen zuviel Personal zuteilten.
- Durch Maßnahmen der Personalzuordnung ließ sich die Kapazitätsauslastung insgesamt nicht merklich verbessern, was vielfach zu einer gewissen Enttäuschung führte. Jedoch sorgte eine relativ gleichmäßige Länge der Warteschlangen für einen kontinuierlichen Produktionsfluß und damit für eine höhere Produktionsgeschwindigkeit.

(12) Prioritätsregelbestimmung.

Als das am häufigsten verwendete Versuchsfeld erwies sich das Auffinden einer "optimalen" Prioritätsregel.

Die meisten Studenten gaben sich mit dem Vergleich einfacher Vorrangregeln zufrieden, wobei gängige Regeln wie FCFS, FIS, KOZ und KFZ den Vorrang genossen. Diese Vorgehensweise zeigte sich auch als richtig, da einem Test kombinierter Prioritätsregeln ein gewisser Lernprozeß vorausgehen muß, in dem die isolierte Wirkungsweise der einzelnen Kriterien studiert werden kann.

Ein "erfahrener" Benutzerkreis ging besonders systematisch vor, indem er zunächst sämtliche einfachen Regeln, anschließend alle Zweierkombinationen und dann ausgewählte Dreierkombinationen von Prioritätskriterien testete.

Bereits beim Test einzelner Kriterien traten einige Ergebnisse auf, die den Benutzern unerklärlich erschienen, z.B.:

- Bei Anwendung der KURZ-Regel wurden durchaus nicht immer die kürzesten Umrüstzeiten erzielt, vielmehr war dies bei der LOZ-, LFZ-, LRFZ- und KSZ-Regel der Fall. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, daß beim Einsatz

des Umrüstzeit-Kriteriums Warteschlangen relativ gleichmäßiger Länge entstehen, die es nicht erlauben, besonders viele gleichartige Aufträge zusammenzufassen. Wendet man jedoch beispielsweise das Längste-Operationszeit-Kriterium an, so kann u.U. eine Situation entstehen, in der durch sehr lange Warteschlangen eine Zusammenfassung zahlreicher Aufträge derselben Klasse möglich ist.

- Die Anwendung der KAP-Regel führte nicht zwangsläufig zu den geringsten Kapitalbindungswerten in der Fertigung. Der Grund liegt darin, daß andere Prioritätsregeln, z.B. eine KOZ-Regel, eine erheblich höhere Abfertigungsrate von Aufträgen hervorzubringen vermag als die KAP-Regel. Damit befinden sich entsprechend weniger Aufträge in der Fertigung, was zu einer relativ geringen Kapitalbindung führen kann. Meist entsteht dann eine Situation, bei der gegenüber der KAP-Regel zwar die Einzelwerte je Auftrag in der Fertigung höher sind, nicht jedoch die gesamte Kapitalbindung.

7.3.3. Verwendung des Ergebnisteils

Während "Anfänger" den gesamten Ergebnisteil studieren wollten, bildete sich bei zunehmendem Grad der Vertrautheit mit dem System eine spezifische Arbeitsweise heraus:

- (1) Sofortiger Sprung zum Alternativen-Vergleich und Eintrag der Ergebnisse in die gewünschte Zeile,
- (2) Betrachtung von höchstens zwei zusätzlichen Ergebnispräsentationen,
- (3) nur in Ausnahmefällen (bei unverständlicher Reaktion des Modells) Aufruf zusätzlicher Informationen aus der untersten Berichtsebene (z.B. Status-Berichte bei extrem hohen Verweilzeiten der Aufträge oder Inhalte einzelner Warteschlangen bei extremer Länge derselben).

Die Benutzer begrüßten insbesondere die Tatsache, daß sie nicht mit Informationen überhäuft wurden, sondern selbst zwischen verschiedenen Berichtsebenen wählen konnten.

7.3.4. Allgemeine Erkenntnisse

Neben den bisher geschilderten detaillierten Beobachtungen lassen sich generell folgende Erfahrungen formulieren:

- (1) Die On-line-Konzeption des Modells wurde deshalb als positiv hervorgehoben, weil man im Gegensatz zu Unternehmensplanspielen viel mehr Möglichkeiten besitzt, verschiedene Alternativen auszutesten. Teilnehmer am CET fanden es besonders interessant, den Simulationsablauf über die Zeit hinweg zu beobachten. Einhellige Meinung herrschte darüber, daß die Arbeit mit dem Bildschirm einfach "Spaß mache".
- (2) Den wirksamsten Einsatzzweck des Modells sahen die Studenten im Rahmen eines Seminars, in dem in mehreren Dialogsitzungen bestimmte Probleme mit Hilfe des Werkstattssimulators gelöst werden konnten. Hohen Wert legten die Studenten insbesondere auf die Möglichkeit, den Dialog jederzeit abzubrechen, und die wichtigsten am Drucker ausgegebenen Zwischenergebnisse zu Hause zu überdenken und auszuwerten.
- (3) Häufig resultierten aus bestimmten Entscheidungen Ergebnisse, die für die Benutzer auf den ersten Blick nicht erklärbar werden. Jedoch wurde gerade dieses Phänomen von der Mehrzahl positiv aufgefaßt, weil - wie es eine Gruppe formulierte - "man gezwungen sei, sich eine Erklärung zu suchen". In den meisten Fällen genügte bereits eine Einsichtnahme in untere Berichtsebenen, wie z. B. die Status-Berichte der einzelnen Produkte. Oft mußte jedoch auch der Betreuer bestimmte Ergebnisse erläutern (vgl. Einzelheiten in Abschnitt 7.3.3.). Im Gegensatz zur konventionellen Lehre ist in diesem Fall gewährleistet, daß angesichts des durchgeführten Simulationsbeispiels die Erläuterung von allen Beteiligten verstanden wird.
- (4) Auf die Frage, welche Lerneffekte das Modell den Studenten geboten habe, antworteten die meisten, daß sie die Zusammenhänge in einem kleinen Bereich eines Produktionsbetriebes begriffen hätten. Einige beschränkten sich auf die Aussage, daß sie einen Begriff von der Komplexität der Entscheidungen

im Produktionsbereich erhalten hätten. Eine Gruppe, die sich speziell mit Prioritätsregeln befaßte, fühlte sich durchaus in der Lage, im Rahmen eines der in der Praxis üblichen Modularprogramms zur Feinplanung die dort angebotene kombinierte dynamische Prioritätsregel nach der jeweiligen Zielsetzung mit sinnvollen Gewichtungsfaktoren zu versehen.

Auch wurde die Erfahrung im Umgang mit einem Simulator positiv hervorgehoben, da solche Modelle dem Studenten meist nur aus theoretischer Anschauung bekannt sind.

8. Anhang

8.1. Liste der verwendeten Symbole

i	: Stationsnummer im Rahmen einer Bearbeitungsreihenfolge
j	: Produktnummer (Auftragsklasse)
b_{ij}	: Bearbeitungsreihenfolge für das Produkt j
m_j^p	: Anzahl der Stationen in der Bearbeitungsreihenfolge des Produktes j
i	: Nummer einer Maschinengruppe
r_{i,j_1,j_2}	: Rüstzeiten je Arbeitseinheit von Produkt j_1 auf Produkt j_2
r_{i,j_1,j_2}^*	: Rüstzeiten je Maschinengruppe von Produkt j_1 auf Produkt j_2
p_i^2	: Personalanzahl je Maschinengruppe i
m_i^2	: Maschineneinsatz je Maschinengruppe i
o_{ij}	: Stückzeiten
o_{ij}^*	: Operationszeiten
l_j^p	: Losgrößen je Produkt
f_j	: Fertigungszeiten je Produkt
u	: Einheits-Übergangszeiten
$u_{i_1 i_2}^*$	: Übergangszeiten zwischen Maschinengruppen i_1 und i_2
$d_{i_1 i_2}$	: Entfernungen zwischen Maschinengruppen i_1 und i_2
E_a	: Endtermin
v	: Faktor zur Berechnung der Soll-Durchlaufzeiten
s_j	: Soll-Durchlaufzeiten
p_j^p	: Produktwerte je Stück
$p_j^p^*$	: Produktwerte je Los
w_{in}	: Warteschlangenelement je Maschinengruppe i
a_j	: Einzelauftrag in der Fertigung von der Auftragsklasse j
a_j^*	: Auftrag mit der höchsten Priorität in der Warteschlange

n_i^w	: Aktuelle Länge der Warteschlange w_{in}
A_a	: Ankunftsstermin eines Auftrags a^j in der Werkstatt
g_a	: Restfertigungszeit eines Auftrags a^j
z	: Nummer der bevorstehenden Station eines Auftrags a^j
h_a	: Schlupfzeit des Auftrags a^j
$t_1 \dots t_8$	: Zwischenwerte zur Erläuterung der Schlupfzeitregel
I	: Istzeit (aktuelle Uhrzeit im Simulationsablauf)
i'	: Folgemaschine von Maschine i
k	: Nummer des Prioritätskriteriums
c_{ka}	: Rangziffer eines Auftrags a^j innerhalb einer Warteschlange bezüglich des Kriteriums k
e_k	: Kriteriengewicht
p_a^r	: Priorität eines Auftrags
p_a^{r*}	: Maximale Priorität
x_1, y_1	: Koordinaten der Maschinengruppe i_1
x_2, y_2	: Koordinaten der Maschinengruppe i_2
m_i^1	: Anzahl installierter Maschinen je Gruppe
p^1	: Personalanzahl insgesamt in der Werkstatt
l_i^w	: Maximal zulässige Länge einer Warteschlange
x_{i+1}^z, x_i^z	: Neue Zufallszahl, alte Zufallszahl
x_0^z	: Startwert des Zufallszahlengenerators
a^z	: Konstanter Multiplikator des Zufallszahlengenerators
m^z	: Konstante
C^T	: Gesamtkosten im Planungszeitraum T
α	: Materialgemeinkosten je Einheit der Lastlaufzeit
Q_i	: Lastlaufzeiten je Maschinengruppe
T	: Betrachtungszeitraum

- c_j : Materialeinzelkosten für ein Stück eines Loses von Produkt j
- f_i : Fixkosten je Maschine einer Maschinengruppe i je Zeiteinheit
- δ_i : Variable Kosten je eingesetzter Maschine einer Maschinengruppe i je Einheit der Lastlaufzeit
- ε : Variable Kosten je Zeiteinheit einer planmäßigen Instandhaltungsaktion bzw. Zufallsreparatur
- z : Summe aller Instandhaltungszeiten
- η_i : Lagerkosten pro reserviertem Zwischenlagerplatz je Zeiteinheit
- μ : Personalkosten je Arbeitskraft je Zeiteinheit

3.2. Liste der verwendeten Abkürzungen

CET	: Computerunterstütztes Entscheidungstraining
WSS	: Werkstatt-Simulations-System
FCFS	: First-Come-First-Served-Regel
FIS	: First-in-System-Regel
LIS	: Last-in-System-Regel
KOZ	: Kürzeste-Operationszeit-Regel
LOZ	: Längste-Operationszeit-Regel
KFZ	: Kürzeste-Fertigungszeit-Regel
LFZ	: Längste-Fertigungszeit-Regel
KRFZ	: Kürzeste-Restfertigungszeit-Regel
LRFZ	: Längste-Restfertigungszeit-Regel
KURZ	: Kürzeste-Umrüstzeit-Regel
KSZ	: Kleinste-Schlupfzeit-Regel
KAP	: Kapitalbindungs-Regel
KMR	: Kritische-Maschinen-Regel
EP	: Externe-Prioritäts-Regel
KOMBI	: Kombinierte dynamische Prioritätsregel

6.3. Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1 : Beispiele zum Aufbau technologischer Reihenfolgen	34
Tab. 2 : Aufbau von Maschinenfolgen bei der Reihenfertigung	35
Tab. 3 : Beispiel zur Bestimmung von Operations- und Rüstzeiten	36
Tab. 4 : Schlupfzeitregel bei terminkritischen und -unkritischen Aufträgen	44
Tab. 5 : Zahlenbeispiel zur Funktionsweise der kombinierten dynamischen Prioritätsregel	49
Tab. 6 : Entfernungsmatrix zwischen je 2 Maschinengruppen i_1 und i_2	52
Tab. 7 : Beispiel zur Ermittlung der Instandhaltungszeiten	54
Tab. 8 : Beispiel einer Ereignisliste vor Einplanung eines Auftrags	57
Tab. 9 : Beispiel einer Ereignisliste nach Einplanung eines Auftrags	57
Tab. 10 : Versuch 2: Ergebnistabellen	137-138
Tab. 11 : Versuch 6: Ergebnistabellen	139-142
Tab. 12 : Versuch 2: Ergebnismuster	143
Tab. 13 : Versuch 6: Ergebnismuster	144-145
Tab. 14 : Layoutplanung: Versuchsreihe mit unverändertem Layout	158
Tab. 15 : Layoutplanung: Versuchsreihe mit verbessertem Layout	158
Tab. 16 : Personalzuordnung in Verbindung mit Maschineneinsatz: Versuchsreihe ohne Veränderung der Personalzuordnung oder des Maschineneinsatzes	159
Tab. 17 : Personalzuordnung in Verbindung mit Maschineneinsatz: Versuchsreihe nach veränderter Personalzuordnung	160
Tab. 18 : Personalzuordnung in Verbindung mit Maschineneinsatz: Versuchsreihe nach veränderter Personalzuordnung und verändertem Maschineneinsatz	160
Tab. 19 : Instandhaltungsplanung: Versuchsreihe ohne Einsatz von Instandhaltungsmaßnahmen	161
Tab. 20 : Instandhaltungsplanung: Versuchsreihe unter Einsatz von Instandhaltungsmaßnahmen	162

	Seite
Tab. 21 : Versuch 1: Ergebnistabellen	A110-A123
Tab. 22 : Versuch 2: Ergebnistabellen	A124-A125
Tab. 23 : Versuch 3: Ergebnistabellen	A126-A128
Tab. 24 : Versuch 4: Ergebnistabellen	A129-A130
Tab. 25 : Versuch 5: Ergebnistabellen	A131-A132
Tab. 26 : Versuch 6: Ergebnistabellen	A133-A136
Tab. 27 : Versuch 7: Ergebnistabellen	A137-A139
Tab. 28 : Versuch 8: Ergebnistabellen	A140-A142
Tab. 29 : Versuch 9: Ergebnistabellen	A143-A144
Tab. 30 : Versuch10: Ergebnistabellen	A145
Tab. 31 : Versuch 1: Ergebnismuster	A146-A151
Tab. 32 : Versuch 2: Ergebnismuster	A152
Tab. 33 : Versuch 3: Ergebnismuster	A153
Tab. 34 : Versuch 4: Ergebnismuster	A154
Tab. 35 : Versuch 5: Ergebnismuster	A155
Tab. 36 : Versuch 6: Ergebnismuster	A156-A157
Tab. 37 : Versuch 7: Ergebnismuster	A158-A159
Tab. 38 : Versuch 8: Ergebnismuster	A160-A161
Tab. 39 : Versuch 9: Ergebnismuster	A162
Tab. 40 : Versuch10: Ergebnismuster	A163

Tab. 21 - 40: gesonderter Band

8.4. Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1 : Grundstruktur des Modells	32
Abb. 2 : Beispiel einer Anordnung von Maschinengruppen innerhalb eines 6 x 6 - Rasters	51
Abb. 3 : Beispiel für die Wirkung der Länge der Instandhaltungsintervalle auf das Ausfallverhalten einer Maschine	55
Abb. 4 : Zielsystem bei der Werkstattfertigung	62
Abb. 5 : Versuch 6: Kapazitätsauslastung	146
Abb. 6 : Versuch 6: Anzahl der fertigen Aufträge	147
Abb. 7 : Versuch 2: Kapazitätsauslastung	148
Abb. 8 : Versuch 2: Zusammenhang zwischen Kapazitätsauslastung und Fertigstellungszeit	149
Abb. 9 : Zusammenhang zwischen der Fertigstellungsrate in Versuch 6 und der Fertigstellungszeit in Versuch 1	150
Abb. 10 : Versuch 6 - 10: Kapazitätsauslastung	151

8.5. Literaturverzeichnis

- Ackermann, S. S., Even-Flow, A Scheduling Method for Reducing Lateness in Job Shops, *Management Technology* 3 (1963), S. 20 ff.
- Allen, M., The Efficient Utilization of Labor under Condition of Fluctuating Demand, in: Muth, J. F. und Thompson, G. L. (Hrsg.), *Industrial Scheduling*, Englewood Cliffs (N. J.) 1963, S. 252 ff.
- Bainbridge, L. u. a., A Study of Run-Time Human Decision Making Using a Plant Simulator, *Operational Research Quarterly* 19 (1968), S. 91 ff.
- Baker, C. T. und Dzielinsky, B. P., Simulation of a Simplified Job Shop, *Management Science* 6 (1960), S. 311 ff.
- Baker, K. R., Priority Dispatching in the Single Channel Queue with Sequence-Dependent Setups, *Journal of Industrial Engineering* 19 (1968), S. 203 ff.
- Berr, U. und Papendieck, A. J., Produktionsreihenfolgen und Losgrößen der Serienfertigung in einem Werkstattmodell, *Werkstattstechnik* 60 (1970), S. 191 ff.
- Bulkin, M. H., Colley, J. L. und Steinhoff jr., H. W., Load Forecasting, Priority Sequencing and Simulation in a Job Shop Control System, *Management Science* 13 (1966), S. 8-29 ff.
- Buzi, K., Die Simulation optimaler Prioritätsregeln für die Ablaufplanung in der Werkstattfertigung, *Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2085*, Köln und Opladen 1971.
- Cantellow, D. G. u. a., Machine-Shop Problems: An Operational Research Approach, *Operational Research Quarterly* 24 (1973), S. 503 ff.
- Carroll, D. C., Heuristic Sequencing of Single and Multiple Component Jobs, PhD Thesis, MIT, A. P. Sloan School of Management, 1965.
- Chervany, N. L. und Dickson, G. W., An Experimental Evaluation of Information Overload in a Production Environment, *Management Science* 20 (1974), S. 1335 ff.
- Conway, R. W., An Experimental Investigation of Priority Assignment in a Job Shop, RAND Corporation Memorandum RM-3789-PR, Santa Monica (Cal.) 1964.
- Conway, R. W., Maxwell, W. L. und Miller, L. W., *Theory of Scheduling*, Reading (Mass.) 1967.

- Falkenhausen, H. von, Bemerkungen zu den Simulationen der Arbeitsverteilung in Betrieben mit Auftragsfertigung durch Conway und die Hughes Aircraft Company, in: Bussmann, K. F. und Mertens, P. (Hrsg.), *Operations Research und Datenverarbeitung bei der Produktionsplanung*, Stuttgart 1968, S. 251 ff.
- Ferguson, R. und Jones, C., A Computer-Aided Decision System, *Management Science* 15 (1968), S. 550 ff.
- Fleischmann, B. und Saur, H. D., Ein allgemeines Simulationsmodell für mehrstufige kontinuierliche Fertigung, in: Gessner, P. u. a. (Hrsg.), *Proceedings in Operations Research 3*, Würzburg - Wien 1973, S. 420 ff.
- Fogler, H. R., A Pattern Recognition Model for Forecasting, *Management Science* 20 (1974), S. 1178 ff.
- Fox, P. D. und Kriebel, C. H., An Empirical Study of Scheduling Decision Behavior, *Journal of Industrial Engineering* 18 (1967), S. 354 ff.
- Frotscher, J., Ein Simulationsmodell für den Reparaturdienst, in: Schreiter, D. u. a. (Hrsg.), *Simulationsmodelle für ökonomisch-organisatorische Probleme*, Köln und Opladen 1968.
- Gräßler, D., Der Einfluß von Auftragsdaten und Entscheidungsregeln auf die Ablaufplanung von Fertigungsstraßen, Diss. Aachen 1968.
- Greenlaw, P. S. und Hottenstein, M. P., *PROSIM: A Production Management Simulation*, Scranton 1969.
- Gröger, H., EROß (Engine Repair and Overhaul Simulation) - ein Planungsinstrument für Triebwerksinstandhaltungswerkstätten von Luftverkehrsgesellschaften, in: Bussmann, K. F. und Mertens, P. (Hrsg.), *Operations Research und Datenverarbeitung bei der Instandhaltungsplanung*, Stuttgart 1968, S. 137 ff.
- Herold, D., Die Problematik des Layout im Fertigungsbereich von Industriebetrieben, Diss. Berlin 1972.
- Hoch, P., Betriebswirtschaftliche Methoden und Zielkriterien der Reihenfolgeplanung bei Werkstatt- und Gruppenfertigung, Frankfurt/M. - Zürich 1973.
- Hollier, R. H., A Simulation Study of Sequencing in Batch Production, *Operational Research Quarterly* 19 (1968), S. 389 ff.
- Hurst, E. G. und McNamara, A. B., Heuristic Scheduling in a Woolen Mill, *Management Science* 14 (1967), S. B-182 ff.
- IBM (Hrsg.), *COPICS Communication Oriented Production Information and Control System*, Kapitel 6: Fertigungs- und Kapazitätsplanung, IBM Form E 12-1234-0.

- Jackson, J. R., Simulation Research on Job Shop Production, Naval Research Logistics Quarterly 4 (1957), S. 287 ff.
- Keck, H., Die Bearbeitung einiger Ablaufplanungsmodelle mit Hilfe der Simulation. Eine Literaturstudie, in: Bussmann, K. F. und Mertens, P. (Hrsg.), Operations Research und Datenverarbeitung bei der Produktionsplanung, Stuttgart 1968, S. 215 ff.
- Kinzer, D., Fertigungssteuerung mit Modularprogrammen, Berlin - Köln - Frankfurt/M. 1972.
- Koxholt, R., Die Simulation - ein Hilfsmittel der Unternehmensforschung, München - Wien 1967.
- Kress, H., Untersuchungen zur Bestimmung der optimalen Organisation von Instandhaltungsarbeiten an Fertigungsmaschinen bei Werkstättenfertigung anhand eines Simulationsmodells, Diss. München 1968.
- Kress, H., Bibliographie der Instandhaltungsliteratur, Meisenheim am Glan 1970.
- Kroll, D. E., PROSIM W: A Production System Simulator, in: Highland, H. J. (Hrsg.), Winter Simulation Conference, Washington 1974.
- Krupp-Gemeinschaftsbetriebe (Hrsg.), ELPROSKO 4, Elektronisches Produktionssteuerungs- und Kommunikationssystem, Arbeitspapier anlässlich einer Tagung vom 20.3.1975 in Essen.
- LeGrande, E., The Development of a Factory Simulation System Using Actual Operating Data, Management Technology 3 (1963), S. 1 ff.
- Leigh, J. G., A Model for Predicting the Performance of a Job Shop, Operational Research Quarterly 25 (1974), S. 131 ff.
- Matthée, R., MABETRA - materialflußorientierte Betriebsmittelanordnung mit minimaler Transportleistung, Industrial Engineering 4 (1974), S. 99 ff.
- Mertens, P., Simulation, Stuttgart 1969.
- Mertens, P., Industrielle Datenverarbeitung, Band 1, 2. Aufl., Wiesbaden 1972.
- Mertens, P. und Griese, J., Industrielle Datenverarbeitung, Band 2, Wiesbaden 1972.
- Mize, J. H. u. a., PROSIM V: Administrator's Manual: Production System Simulator, Englewood Cliffs (N. J.) 1971.
- Moodie, C. L. und Novotny, D. J., Computer Scheduling and Control Systems for Discrete Part Production, Journal of Industrial Engineering 19 (1968), S. 336 ff.

- Müller, E., Simultane Lagerdisposition und Fertigungsablaufplanung bei mehrstufiger Mehrproduktfertigung, Berlin - New York 1972.
- New, C. C., Job Shop Scheduling: Is Manual Application of Dispatching Rules Feasible?, Operational Research Quarterly 26 (1975), S. 35 ff.
- Nicholson, T. A. J. und Pullen, R. D., A Practical Control System for Production Schedules, International Journal of Production Research 9 (1971), S. 219 ff.
- Niedereichholz, J., Zur Simulation statischer Job Shop Modelle mit GPSS, Elektronische Datenverarbeitung 12 (1970), S. 394 ff.
- Österle, H., Das Computerunterstützte Entscheidungstraining - Konzept, Experimente und Anforderungsprofil, Diss. Nürnberg 1973.
- Oldfather, P. M. u. a., Programming by Questionnaire: The Job Shop Simulation Program Generator, RAND Corporation Memorandum RM-5162-PR, Santa Monica (Cal.) 1967.
- Ordelheide, D., Instandhaltungsplanung, Wiesbaden 1973.
- Pressmar, D. B., Theorie der dynamischen Produktionsplanung, Habilitationsschrift Hamburg 1972.
- Reitbauer, F., Das Trainingssystem im Computerunterstützten Entscheidungstraining, Diss. Nürnberg 1973.
- Ritzmann, L. P., The Efficiency of Computer Algorithms for Plant Layout, Management Science 18 (1972), S. 240 ff.
- Rowe, A. J., Toward a Theory of Scheduling, Journal of Industrial Engineering 11 (1960), S. 125 ff.
- Rueger, M., Die Berücksichtigung reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten bei der Reihenfolgeplanung, Diss. Köln 1974.
- Scheer, A. W., Instandhaltungspolitik, Wiesbaden 1974.
- Schmitz, P. und Minnemann, J., Ein GPSS-Programm zur Auftragsfertigung bei zeitabhängiger Priorität der Aufträge, Angewandte Informatik 13 (1971), S. 69 ff.
- Schreiter, D., Ein Simulationsmodell zur Lösung des Reihenfolgeproblems bei gleicher technologischer und organisatorischer Reihenfolge, in: Schreiter, D. u. a. (Hrsg.), Simulationsmodelle für ökonomisch-organisatorische Probleme, Köln und Opladen 1968, S. 13 ff.

- Seelbach, H., Interdependente Programm- und Prozeßplanung, in:
Koch, H. (Hrsg.), Zur Theorie des Absatzes, Wiesbaden 1973,
S. 447 ff.
- Smith, H. T. und Crabtree, R. G., Interactive Planning: A Study
of Computer Aiding in the Execution of a Simulated Scheduling
Task, International Journal of Man-Machine Studies 7 (1975),
S. 213 ff.
- Vergin, R. C., Scheduling Maintenance and Determining Crew Size
for Stochastically Failing Equipment, Management Science 13
(1966), S. B-52 ff.
- Wallenius, J., Comparative Evaluation of some Interactive
Approaches to Multicriterion Optimization, Management
Science 21(1975), S. 1387 ff.
- Wesolowsky, G. O., Location of Facilities with Rectangular Distances
Among Point and Area Destinations, Naval Research Logistics
Quarterly 18 (1971), S. 83 ff.
- Wilbrecht, J. K. und Prescott, W. B., The Influence of Setup Time
on Job Shop Performance, Management Science 16 (1970),
S. B-294 ff.

LEBENS LAUF

19. 12. 1946 in Stuttgart geboren
1. 4. 1953 Einschulung
1. 4. 1957 Eintritt in das Johannes-Kepler-Gymnasium in Stuttgart
1. 4. 1963 Übertritt zum Dillmann-Gymnasium in Stuttgart
25. 2. 1966 Bestehen der Reifeprüfung
1. 4. 1966 Eintritt in die Bundeswehr als Wehrpflichtiger
30. 9. 1967 Entlassung aus der Bundeswehr
15. 10. 1967 Beginn des Studiums der Volkswirtschaft an der Universität Stuttgart
19. 8. 1968 Beschäftigungsverhältnis als Werkstudent im Controlling-Bereich der IBM, Werk Sindelfingen, bis zum 11. 10. 1968
17. 2. 1969 Weitere Praktikantentätigkeit in der Abteilung Baukostenkontrolle und -überwachung der IBM in Böblingen bis zum 25. 4. 1969
1. 5. 1969 Übertritt zur Friedrich Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zum Studium der Betriebswirtschaft
4. 8. 1969 Eintritt in den Bereich "Quelle-Reisen" des Großversandhauses Quelle mit dem hauptsächlichen Aufgabengebiet der Ergebnisplanung und -kontrolle bis zum 31. 1. 1970.
1. 6. 1970 Mitarbeit am Betriebswirtschaftlichen Institut, Lehrstuhl für Betriebs- und Wirtschaftsinformatik an der Universität Erlangen-Nürnberg (Prof. Dr. P. Mertens) als wissenschaftliche Hilfskraft bis zum Abschluß des Studiums

17. 5. 1972

Bestehen des Diplom-Examens als Diplom-Kaufmann mit der Gesamtnote "gut"

1. 6. 1972

Fortsetzung der Tätigkeit am Lehrstuhl für Betriebs- und Wirtschaftsinformatik (Prof. Dr. P. Mertens) als Verwalter einer Stelle eines Wissenschaftlichen Assistenten

Copy-Center 2000

852 ERLANGEN · Obere Karlstr. 30
Tel. 09131-26197